

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ
KATEDRA MATERIÁLU

Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3911R018 Materiály a technologie
Zaměření: Materiálové inženýrství

Studium porézních struktur v přírodních objektech

Study of porous structures in natural objects

KMT – B – 210

Tomáš Urban

Vedoucí práce: doc. Ing. Dora Kroisová, Ph.D.

Konzultant: Ing. Jiří Ron, Ing. Aleš Petrán

Počet stran: 64

Počet tabulek: 0

Počet obrázků: 53

Počet grafů: 0

Počet příloh: 0

Datum: 4. 1. 2013



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení	Tomáš URBAN
studijní program	2341 B Strojírenství
obor	Materiály a technologie
zaměření	Materiálové inženýrství

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářská práce na téma:

Studium porézních struktur v přírodních objektech

Zásady pro vypracování:

(uved'te hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

- 1) Seznamte se s vlastnostmi a strukturami syntetických porézních materiálů.
- 2) Vyberte příklady porézních materiálů nacházejících se v přírodě.
- 3) Porovnejte charaktery struktur syntetických i přírodních materiálů.
- 4) Diskutujte výsledky a zformulujte závěry.



Forma zpracování bakalářské práce:

- průvodní zpráva v rozsahu 25 - 40 stran

- přílohy

Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu):

[1] Raab, M. *Materiály a člověk*. Praha: Encyklopedický dům. (1999).

[2] Campbell, N. A., & Reece, J. B. *Biologie*. Brno: Computer Press. (2008).

[3] Bar-Cohen, Y. (Ed.). *Biomimetics: biologically inspired technologies*. Boca Raton, FL: Taylor & Francis. (2006).

[4] Bhushan, B. Biomimetics: lesson from nature - an overview. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 367,1445-1486. (2009).

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Dora Kroisová, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce: Ing. Jiří Ron, Ing. Aleš Petrář

L.S.

prof. Ing. Petr LOUDA, CSc.
vedoucí katedry

doc. Ing. Miroslav MALÝ, CSc.
děkan

V Liberci dne 24.09.2012

Platnost zadání bakalářské práce je 15 měsíců od výše uvedeného data (v uvedené lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ). Termíny odevzdání bakalářské práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum: 4. ledna 2013

Podpis:

Tomáš Urban

Poděkování

Mé poděkování patří všem, kteří mě během mého studia podporovali, a to zejména mé přítelkyni, rodině a přátelům. Dále děkuji doc. Ing. Doře Kroisové, Ph.D. za svědomité vedení mé bakalářské práce a Ing. Pavlu Kejzlarovi za pomoc při tvorbě snímků na rastrovacím elektronovém mikroskopu.

Anotace

Cílem bakalářské práce je seznámení s porézními strukturami přírodních a technických materiálů, a s pomocí rastrovací elektronové mikroskopie detailně popsat struktury v deseti vybraných přírodních objektech. Pro pozorování byl vybrán skelet a zub ježovky černé, skelet ježovky srdcové, sépiová kost, skořápka vejce kura domácího, stonek šáchoru střídavolistého, stonek sítiny rozkladité, stonek bezu černého, borka borovice lesní a vnitřní skelet mořské houby. Získané poznatky o přírodních objektech byly poté využity pro porovnání s technickými materiály.

Klíčová slova

Elektronová mikroskopie, porozita, porézní struktury ,přírodní materiály, technické pěny.

Annotation

The aim of bachelor thesis is to introduce the porous structures of natural and technical materials and describe in detail the structure of ten selected natural objects by using scanning electron microscopy. For observation was chosen skeleton and tooth of black urchin, skeleton of heart urchin, cuttlebone, chicken eggshell, umbrella palm stem, soft rush stem, elderberry stem, scots pine bark and endoskeleton of sea sponge. Acquired knowledge about natural objects were then used to compare with technical materials.

Keywords

Electron microscopy, porosity, porous structures, natural materials, technical foams.

Obsah

Prohlášení

Poděkování

Anotace

1 Úvod.....	10
2 Teoretická část	12
2.1 Úvod do porézních materiálů.....	12
2.1.1 Klasifikace pórů.....	12
2.1.2 Klasifikace porézních materiálů	13
2.2 Syntetické porézní materiály	13
2.2.1 Kovové pěny	14
2.2.2 Polymerní pěny	16
2.2.3 Porézní keramika	19
2.3 Přírodní porézní materiály	22
3 Experimentální část.....	24
3.1 Elektronová mikroskopie.....	24
3.1 Vybrané přírodní materiály.....	25
3.1.1 Skelet a zub ježovky černé.....	26
3.1.2 Skelet ježovky srdcové	33
3.1.3 Sépiová kost.....	37
3.1.4 Skořápka vejce kura domácího	39
3.1.5 Stonek šáchoru střídavolistého	42
3.1.6 Stonek sítiny rozkladité	45
3.1.7 Stonek bezu černého	48
3.1.8 Kůra borovice lesní.....	50
3.1.9 Mořská houba	53
4 Výsledky a jejich diskuse	56
5 Závěr	59
6 Literatura a použité zdroje	61

Seznam zkratek

BET	Brunauer-Emmetova-Tellerova metoda
BJH	Barrett-Joyner-Halendova metoda
EPS	Extrudovaný polystyren
IUPAC	International union of pure and applied chemistry (Mezinárodní unie pro čistou a užitnou chemii)
PUR	Polyuretan
SEM	Scanning electron microscopy (rastrovací elektronová mikroskopie)
TEM	Transmission electron microscopy (transmisní elektronová mikroskopie)
TDI	Toluen diisokyanát

1 Úvod

Život se na planetě Zemi vyvíjí již miliony let a za tuto dobu se vyvinul do neuvěřitelně rozmanitých forem všude kolem nás. Člověk obývá Zemi velmi krátce, a i když za dobu své krátké existence dosáhl značných úspěchů a objevů, génia přírody stále zdaleka nedosahuje. Není proto nic jednoduššího než se přírodou nechat inspirovat a získané poznatky aplikovat v technické praxi. Dnes se tomuto spojení dvou poměrně odlišných oborů, tedy biologie a techniky, říká bionika, což je vědní obor, který v sobě skrývá velký potenciál do budoucna.

Stejně jako se vyvíjel život, vyvíjely se i materiály a podíváme-li se dnes kolem sebe, do říše rostlinné či živočišné, nalezneme téměř na každém kroku různorodé využití pórovitých materiálů. Takováto struktura má výhodu nízké hmotnosti aniž by snižovala mechanické vlastnosti materiálu (lidské a zvířecí kosti, různé vnitřní a vnější skelety živočichů), může sloužit jako prostředek látkové výměny (vejce živočichů, semena rostlin), nebo může být využita pro vedení vody, vzduchu či živin (kořeny, stonky či listy rostlin). Díky těmto vlastnostem vzrůstá využití porézních struktur i v technické praxi, a to zejména v automobilovém, stavebním a chemickém průmyslu či v biotechnologiích.

Cílem této práce je studium právě takových porézních struktur v deseti vybraných přírodních objektech. Pomocí rastrovací elektronové mikroskopie zhotovit snímky porézních struktur jednotlivých vzorků, detailně je popsat a získané poznatky využít pro porovnání s porézními materiály technickými. Skupinu pozorovaných přírodních objektů tvoří skelet a zub ježovky černé, skelet ježovky srdcové, sépiová kost, skořápka vejce kura domácího, stonek šáchoru střídavolistého, stonek sítiny rozkladité, stonek bezu černého, borka borovice lesní a vysušená vnitřní kostra mořské houby.

Text práce je rozdělen celkem do šesti kapitol z nichž hlavními kapitolami jsou tyto čtyři:

Kapitola druhá se zabývá teorií. Je zaměřena na definici porézních materiálů a základních pojmů z této oblasti, popis výrobních metod a struktur vybraných zástupců technických porézních materiálů a nakonec obsahuje krátký úvod k porézním materiálům přírodním.

Kapitola třetí je experimentální a je nejobsáhlejší. Popisuje jednotlivé přírodní objekty a je z velké části tvořena snímky z rastrovacího elektronového mikroskopu. Tyto snímky umožnily detailní popis pozorovaných porézních struktur.

Kapitola čtvrtá obsahuje souhrn a diskusi výsledků získaných z experimentální části, a tyto poznatky o přírodních strukturách porovnává se strukturami materiálů technických.

Kapitola pátá je závěrem práce. Tvoří ji shrnutí výsledků a následné zamyšlení nad využitím těchto poznatků v budoucnu.

Zbývají dvě kapitoly, tedy kapitola první a šestá, tvoří úvod a použitou literaturu.

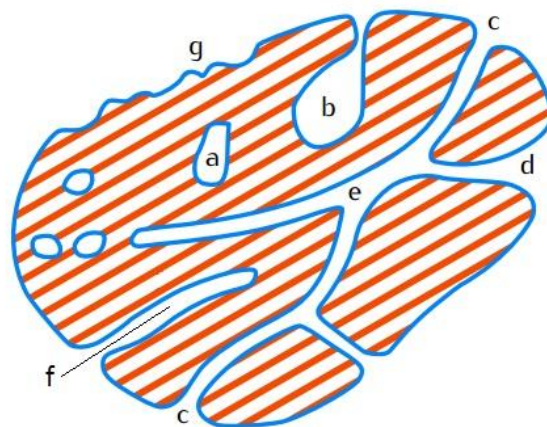
2 Teoretická část

2.1 Úvod do porézních materiálů

Porézní materiál si lze zjednodušeně představit jako materiál celistvý a pevný, který v sobě obsahuje různé dutiny, díry, mezery a kanálky, jedním slovem označované jako póry. Tyto póry se mohou vyskytovat v různých tvarech a velikostech a na materiál a jeho vlastnosti mají zásadní vliv. Porézní materiály jako celky jsou poté charakterizovány pojmy jako pórovitost, distribuce velikosti pórů či velikost povrchu pórů (Pechoušek, 2010, s. 11).

2.1.1 Klasifikace pórů

Jednou z hlavních charakteristik pórů je jejich přístupnost externí tekutině, která je dělí na otevřené a uzavřené (viz obr. 1). Otevřené póry jsou navzájem propojené jak mezi sebou, tak s povrchem dané látky a mohou být jednak zcela průchozí (otevřené na obou koncích) (c), (d) a (e), nebo slepé (pouze jeden konec otevřený) (f) a (b). To přináší jednu velmi zajímavou vlastnost a tou je adsorpce plynů a kapalin. Uzavřené póry jsou naopak od ostatních pórů izolované (a) a výrazně ovlivňují vlastnosti jako je hustota, mechanická pevnost či tepelná vodivost (Pechoušek, 2010).



Obr. 1 Schéma řezu porézní částicí
(Pechoušek, 2010)

Dále lze póry charakterizovat dle jejich tvaru a velikosti (viz obr. 1). Tvary pórů mohou být velmi různorodé, nicméně nejčastěji se vyskytuje tvar cylindrický (c) a (f), baňkovitý (b) nebo trychtýřovitý (d). Velikost pórů je podle IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) rozdělena podle průměru do 3 skupin, a to na mikropóry (průměr do 2 nm), mezopóry (průměr 2 až 50 nm) a makropóry (průměr větší než 50 nm) (Pechoušek, 2010, s. 11).

2.1.2 Klasifikace porézních materiálů

Pórovitost lze definovat jako poměr objemu pórů a objemu materiálu jako celku. Takto získaný poměr velmi závisí na použité metodě hodnocení a navíc nezahrnuje mezičásticový prostor (Pechoušek, 2010, s. 11).

Distribuce velikosti pórů je dána rozdělením velikostí pórů podle IUPAC jak bylo zmíněno výše.

Velikost plochy povrchu pórů je dána součtem velikostí jejich povrchů. Její určení je poměrně složité. Nejběžněji se používá metoda BET (Brunauer-Emmetova-Tellerova metoda), která je založena na adsorpci (fyzisorpci) plynu na povrchu pevné látky. Adsorpce je jev, při kterém se molekuly plynu zachytávají na povrchu pevné látky vlivem slabých Van der Waalsových sil. Toho je využito právě v metodě BET, kdy při vytvoření molekulární monovrstvy molekul plynu na povrchu pevné látky (v tomto případě na vnitřním povrchu všech pórů), při znalosti velikosti plochy, kterou jedna molekula plynu zabírá a je-li známý počet adsorbovaných molekul plynu, je možné spočítat velikost povrchu pórů. Probíhá-li adsorbce dále, dochází ke vzniku multivrstev, jejichž pomocí lze s použitím tzv. adsorpční izotermu metodou BJH (Barrett-Joyner-Halendova metoda) určit výše zmíněnou distribuci velikosti pórů. Dojde-li k úplnému zaplnění pórů, můžeme ze známé hustoty adsorbátu vypočítat celkový objem všech pórů. Předpokladem pro použití této metody je samozřejmě výskyt pórů otevřených (Pinkas a Moravec, s. 1).

2.2 Syntetické porézní materiály

Tato kapitola je zaměřena na porézní materiály, které vyrobil a vyrábí člověk v dnešní době. Zmíněny budou především tři hlavní skupiny a to kovové pěny, polymerní pěny a porézní keramika. Získané poznatky poté poslouží pro porovnání s materiály přírodními.

2.2.1 Kovové pěny

Jak z názvu vyplývá, jedná se o porézní materiály, jež mají kovovou matici. Tato celulární struktura jim poskytuje vynikající fyzikální a mechanické vlastnosti. Mají velmi nízkou hustotu a díky struktuře si dokonce zachovávají svojí pevnost. Mezi další význačné vlastnosti také patří nízká tepelná vodivost, vynikající schopnost pohlcování energie, vysoká prodyšnost plynů či vlastnosti akustické. To vše dělá z kovových pěn materiály s velkým potenciálem a jejich rostoucímu využití v budoucnu se jistě nevyhneme (Křivánek, 2012, s. 11).

Struktura kovových pěn

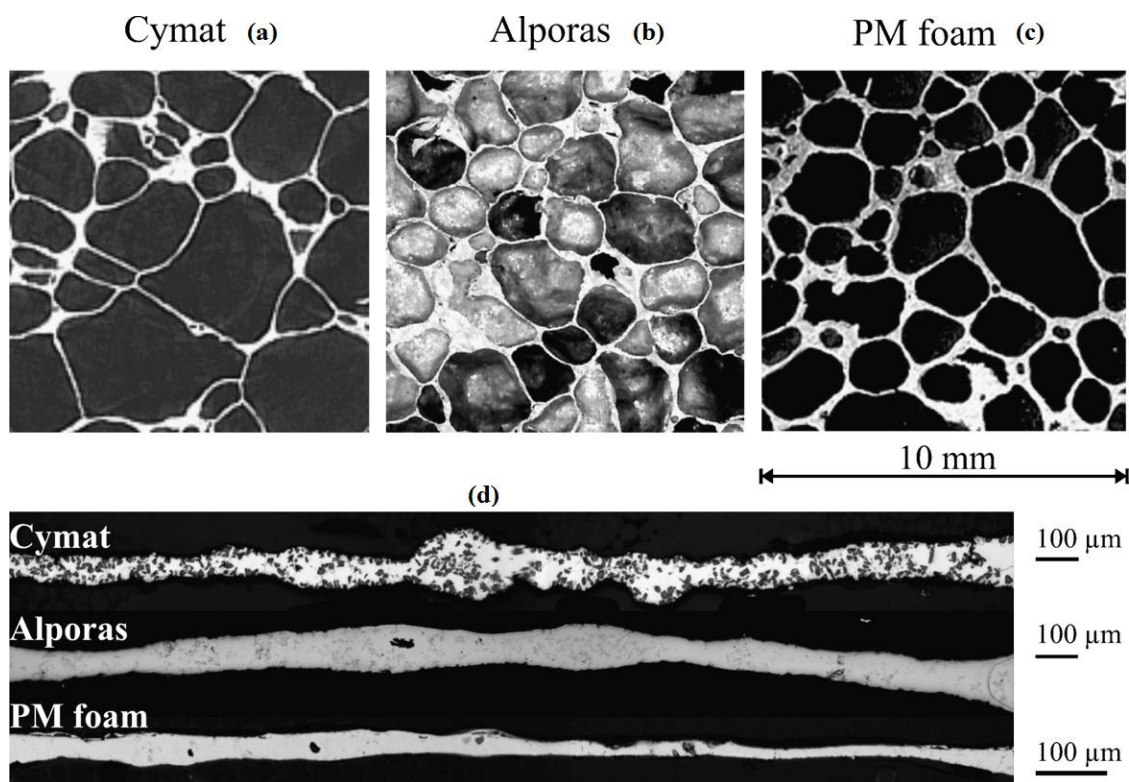
Charakterizace struktury kovových pěn je dána parametry, mezi které patří typ pórů (otevřené nebo uzavřené), velikost pórů, tvar pórů, relativní hustota a anizotropie. Nejjednodušeji se měří hustota, kdy stačí zvážit vzorek, jehož objem je známý. Na ostatní parametry je potřeba použít různých typů mikroskopických technik (Ashby, 2000, str. 24).

Při pozorování vzorku optickou mikroskopií je nezbytné, aby materiál, předtím než bude leštěn, byl napuštěn polymerem (obvykle epoxidem). Toho je dosaženo ponořením vzorku do taveniny nízkoviskózního polymeru a barviva. Následné snížení a opětovné zvýšení tlaku ve vakuové komoře způsobí, že dojde k napěchování polymeru do pórovité struktury. U uzavřených pórů je někdy nutné operaci opakovat, neboť při leštění může dojít k odhalení pórů doposud zavřených. Po vyleštění povrchu vzorku je poté možné optickou mikroskopií s uspokojivými výsledky použít. Rastrovací elektronová mikroskopie nám poskytne detailnější snímky, a také příprava vzorku není tak složitá, jako u mikroskopie optické. Používá se převážně pro materiály s otevřenými póry. Z dalších metod je dobré zmínit tvorbu 3D modelů pomocí CT skeneru, či rentgenovou radioskopii, která umožňuje pozorování dějů, probíhajících při samotné výrobě kovových pěn (Ashby, 2000, str. 24).

Na obr. 2 jsou zobrazeny struktury hliníkových kovových pěn, které byly vyrobeny odlišnými metodami. Cymat[®] (a) je metoda vstřikování plynu do taveniny Al vyztužené částicemi SiC. Druhá metoda nese obchodní název Alporas[®] (b) a jejím principem je

přidávání pěnidla TiH_2 do taveniny Al obohacené o Ca. Na třetím snímku (c) je zobrazena struktura pěny, vyrobené metodou PM foam, nazývané také Alulight[®].

Ta spočívá ve vylisování práškové směsi s přidáním TiH_2 jako pěnidlem. Snímek (d) ukazuje vzhled buněčných stěn pórů u jednotlivých metod (Körner, 2008).



Obr. 2 Snímky struktur (a, b, c) a buněčných stěn pórů (d) hliníkových pěn, vyrobených metodami Cymat[®], Alporas[®] a PM foam (Alulight[®]).

(Körner, 2008)

Z obrázků je patrné, že struktura získaná metodou Cymat[®] (a) je velmi různorodá. Průměr pórů se pohybuje od 0,5 mm do 4 mm a tvar pórů je víceméně nepravidelný. Struktura na obr. 2(c) (metoda PM foam) je o něco pravidelnější. Průměr pórů je také v rozmezí 0,5 mm až 4 mm, nicméně oproti metodě Cymat[®] je průměr většiny pórů 1,5 mm až 2 mm. Také jsou zde vidět časté poruchy ve formě nedokončených pórů. Nejkompaktněji působí struktura získaná metodou Alporas[®] (b). Póry mají průměr od 0,7 do 2 mm a zachovávají si podobný tvar. Poruchy jako u metody PM foam (nedokončené póry) zde nejsou zřejmé.

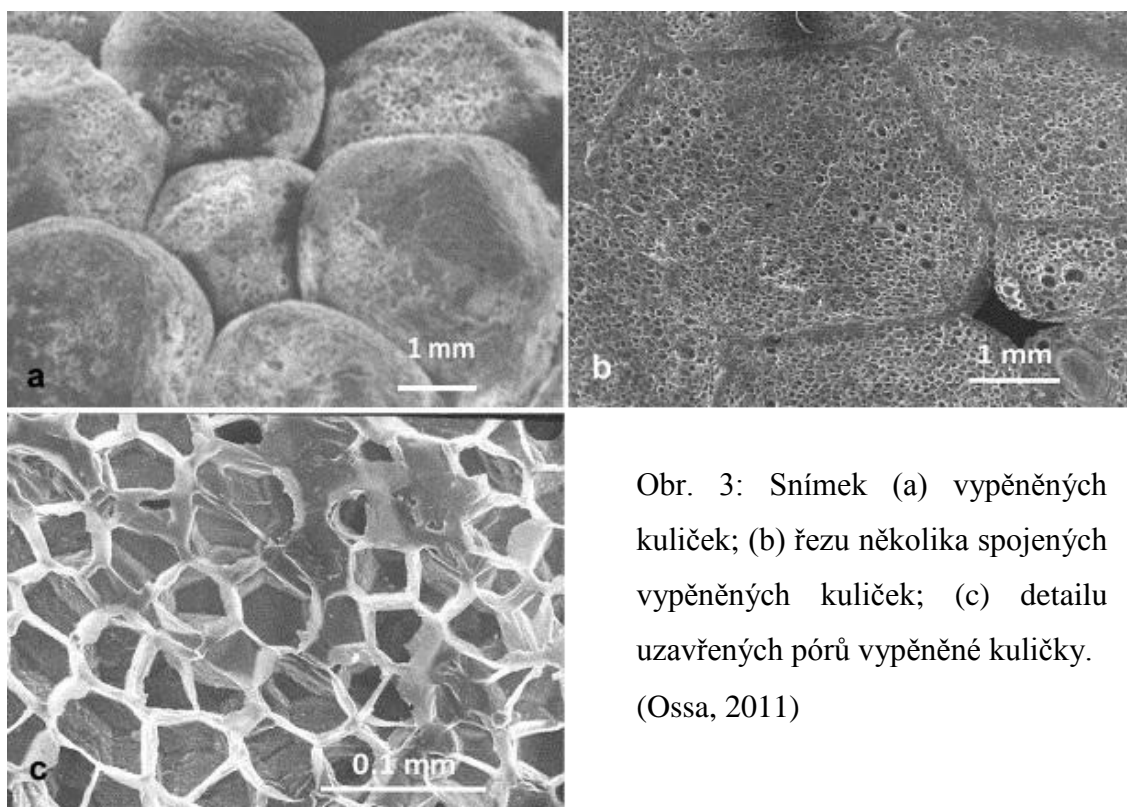
2.2.2 Polymerní pěny

Další velkou skupinou syntetických porézních materiálů jsou polymerní pěny. Mezi nejznámější a nejpoužívanější zástupce patří pěnový polystyren (EPS) a pěnový polyuretan (PUR). S produkty, vyrobenými z těchto materiálů, se setkáváme prakticky každý den a to ve formě izolace, obalů nebo produktů zvyšujících komfort (čalounění, matrace, apod.).

Pěnový polystyren (EPS)

Tento materiál zcela jistě patří mezi nejznámější a nejpoužívanější polymery, a to zejména vzhledem ke svým výjimečným izolačním vlastnostem. Díky tomu je v dnešní době již nedílnou součástí všech nových, případně starých, nově zateplených staveb. Navíc je velmi lehký (98 % jeho objemu tvoří vzduch, zbylá 2 % polystyren), dobře zpracovatelný a také cenově dostupný.

Výroba pěnového polystyrenu má 3 části: Předpěnění, meziuskladnění a zpracování do konečného tvaru. Nejdříve probíhá předpěnění základní suroviny, kterou jsou kuličky zpěňovatelného polystyrenu (zpravidla v sobě obsahují 6 až 7 % pentanu jako nadouvadla). Předpěnění se uskutečňuje ve speciálních předpěňovacích zařízeních za působení vodní páry. Při tomto procesu dochází ke vzniku buněčné porézní struktury v každé kuličce (obr. 3 b). Samotné kuličky se zvětší na dvacet až padesátinásobek svého původního objemu (nevypěněné kuličky výrobci dodávají o průměru 0,3 až 2,8 mm). Výroba dále přechází do druhého stupně, neboli meziuskladnění v provzdušňovacích sílech a sušení. Jelikož proces předpěnění vytváří ve vypěněných kuličkách podtlak (kuličky jsou tak velmi náchylné na mechanické poškození), musí se vyrovnat provzdušňováním (dochází k difuzi vzduchu do buněčné struktury kuliček). Třetím stupněm výroby je pak zpracování kuliček do požadovaných tvarů, jako jsou bloky, desky, obaly, apod. (Sdružení EPS ČR, 2012).



Obr. 3: Snímek (a) vypěněných kuliček; (b) řezu několika spojených vypěněných kuliček; (c) detailu uzavřených pórů vypěněné kuličky. (Ossa, 2011)

Samotné kuličky (obr. 3 a), ze kterých jsou desky a jiné polotovary vyrobené, jsou tedy porézní. Dokazují to obr. 3 (b) a (c), na kterých je porézní struktura dobře patrná. Celý systém kuličky je tvořen uzavřenými póry tvaru mnohostěnu, které jsou vyplněny vzduchem, což je hlavní příčina - zdroj tak výjimečných izolačních vlastností. Průměr pórů je v celém průřezu kuličky zhruba stejný, v rozmezí 30 až 40 μm , výjimečně se vyskytují póry větší. Objemová hmotnost pěnového polystyrenu se pak v praxi pohybuje v rozmezí 8 až 40 kg/m^3 .

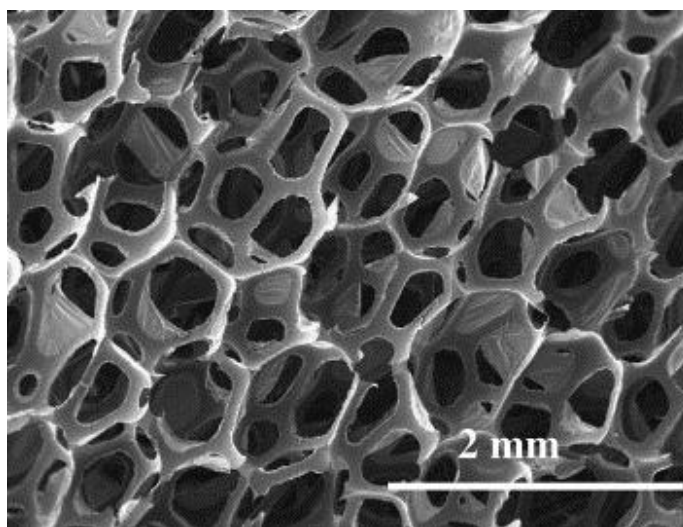
Pěnový polyuretan (PU)

Druhý nejznámější zástupce pěnových polymerů je pěnový polyuretan. Oproti pěnovému polystyrenu je možné ho vyrobit jak s otevřenými, tak uzavřenými póry, což rozšiřuje oblasti jeho použití. Pěnový polyuretan s otevřenými póry (obr. 4) je velmi flexibilní a nejčastěji se používá pro výrobu tepelné a akustické izolace (horší izolační vlastnosti než PU s uzavřenými póry, ale je levnější) či různých výrobků zvyšujících náš komfort, tedy čalounění, matrace, polstrování, apod. Pěnový polyuretan s póry uzavřenými (obr. 5) je mnohem pevnější, a jeho použití je převážně v oblasti tepelné a akustické izolace (lepší izolační vlastnosti než PU s otevřenými póry, navíc je

nenasákavý), případně obalových materiálů. Hustota polyuretanových pěn se obvykle pohybuje v rozmezí 13 až 80 kg/m³ (Yuen, 2007).

Základními surovinami pro výrobu pěnového polyuretanu je toluen diisokyanát (TDI) a polyalkoholy. Dále se přidává nadouvalo (dichlormetan a voda) a případně další aditiva. Samotná výroba probíhá také ve třech krocích: Míšení základních surovin, zpěňování a řezání, chlazení. V prvním kroku dochází ke smíchání vstupních surovin (TDI, polyalkohol, nadouvadla, aditiva), dopravovaných do mísící komory z jednotlivých nádrží. V mísící komoře je navíc instalován rotor s lopatkami pro urychlení samotného míchání. V druhém kroku již dochází k působení nadouvadla, pěna rapidně expanduje a ještě v tekuté formě je dopravována do formovací komory. Zde kopíruje tvar komory a za stálého pohybu komorou směrem vzhůru pomalu tuhne. Na vrcholu formovací komory je pěna již dostatečně tuhá a je zde řezána na 2,2 m dlouhé bloky. Posledním krokem je chlazení, jelikož bloky jsou po výstupu z formovací komory stále horké. Pro dosažení pokojové teploty v celém průřezu bloku probíhá chlazení v chladících komorách až 18 hodin. Vychladlé bloky jsou následně posílány zákazníkovi, či dále tvarovány (Yuen, 2007).

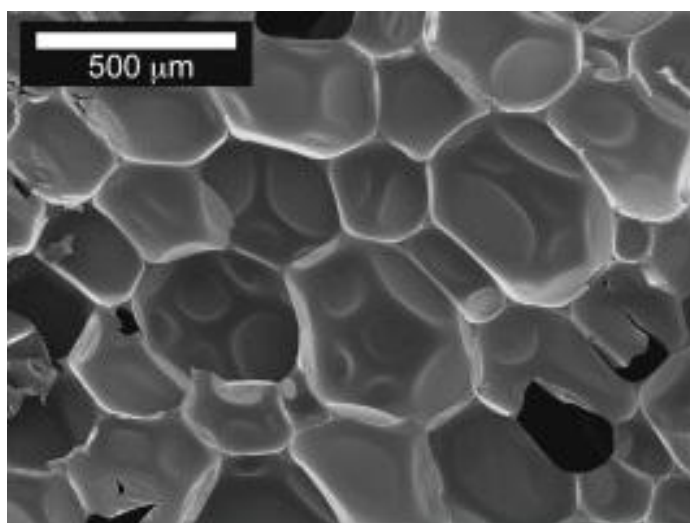
Obr. 4 zobrazuje strukturu polyuretanové pěny s otevřenými póry. Velikost průměru pórů je zde oproti pěnovému polystyrenu řádově větší, a to v rozmezí od 0,4 do 1 mm. Samotné póry mají přibližně tvar mnohostěnu.



Obr. 4: SEM snímek struktury polyuretanové pěny s otevřenými póry.

(Xigeng, 2008)

Na obr. 5 je zobrazena struktura polyuretanové pěny s póry uzavřenými. Oproti struktuře s otevřenými póry se v podstatě liší pouze neporušenými membránami mezi jednotlivými buňkami. Tvar a velikost průměru pórů je víceméně stejná jako u pórů otevřených.



Obr. 5: SEM snímek struktury polyuretanové pěny s uzavřenými póry.

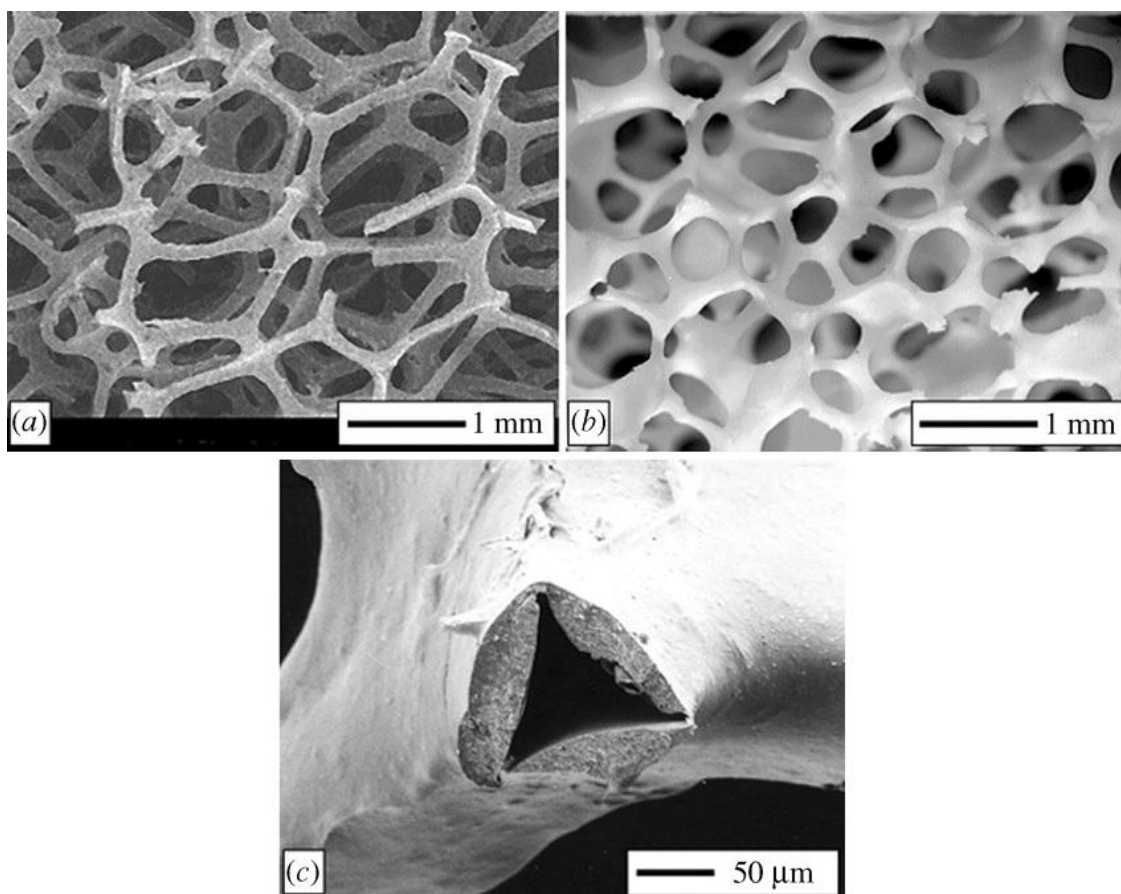
(Patrick a Sottos, 2012)

2.2.3 Porézní keramika

Ze všech tří skupin je porézní keramika známa nejkratší dobu. Více se o tento materiál začali vědci zabývat až zhruba od 60. let 20. století. Oproti kovovým a polymerním pěnám má totiž porézní keramika velmi výjimečné vlastnosti. Její matrice, tedy keramika, jí poskytuje velmi vysokou teplotu tání, odolnost proti otěru a chemickou odolnost, přičemž porézní struktura výčet vlastností obohacuje o nízkou měrnou hmotnost, či v případě otevřených pórů propustnost tekutin. Především poslední zmíněná vlastnost umožňuje využití těchto materiálů v tepelných výměnících, pro výrobu filtrů chemikálií a látek filtrovaných při vysoké teplotě, nebo při heterogenní katalýze. Výhody nízké měrné hmotnosti mohou být uplatněny například v bioinženýrství (Šenk, 2011).

Technologií výroby existuje několik a na výsledné vlastnosti mají samozřejmě velký vliv. Průmyslově nejpoužívanější je replikační metoda (obr. 6). Jejím principem je obalení předlohy vyrobené z polymerní pěny (nejčastěji polyuretan, polystyren nebo polyvinylchlorid) (obr. 6 a) keramickou suspenzí s následným sušením, vypalováním polymeru a slinováním. Vznikne tak keramická pěna totožné struktury, jako měla polymerní předloha (obr. 6 b). Touto metodou lze zpracovávat široké spektrum oxidové i neoxidové keramiky, ale výsledným produktem bude vždy keramická pěna

s otevřenými póry o velikosti 200 μm až 3 mm. Zvláštností této metody je, že výsledný keramický systém je dutý (stopy po polymerovém vzoru - obr. 6 c), což nijak výrazně neovlivňuje mechanické vlastnosti keramické pěny, a dokonce může být tento jev prospěšný ve formě snížení její celkové hmotnosti. Nicméně při vypalování polymerní pěny může docházet k výraznému namáhání keramické pěny vlivem expanze vznikajících plynů, a pokud tento proces není dobře kontrolován a řízen, může dojít ke vzniku mikrotrhlin, což má za následek snížení celkových mechanických vlastností keramické pěny (Colombo, 2005).



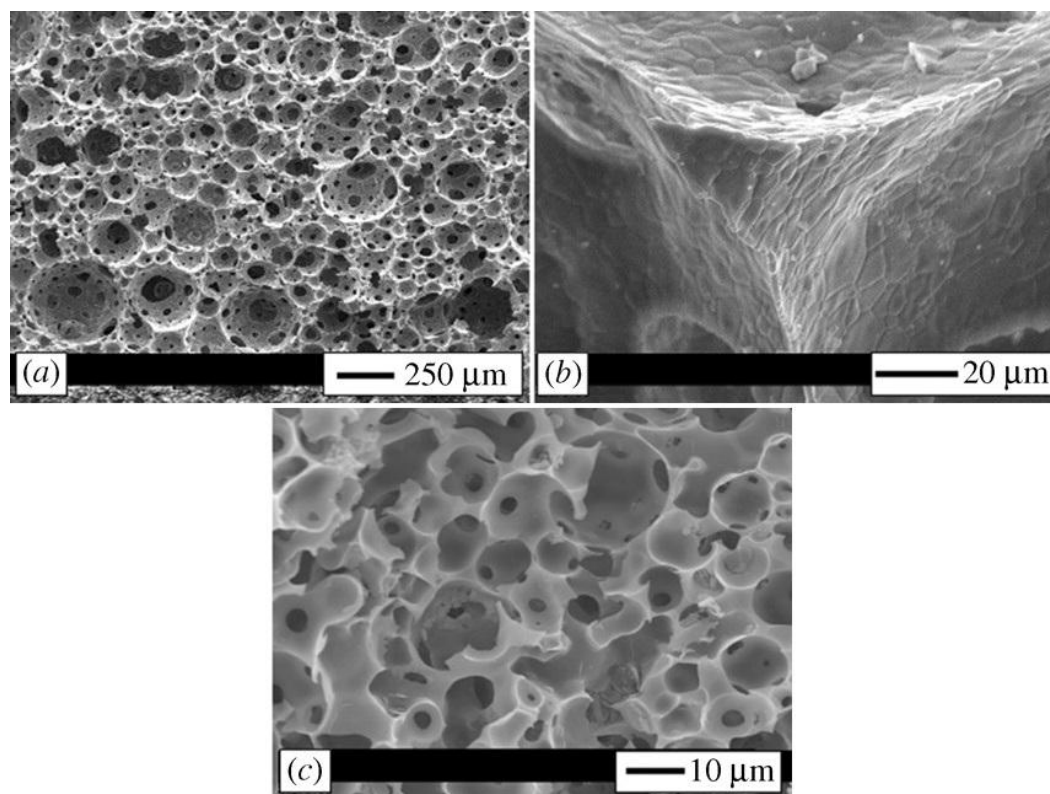
Obr. 6: (a) SEM snímek polyuretanové předlohy; (b) snímek hotové keramické pěny (Al_2O_3) z optického mikroskopu; (c) SEM snímek detailu dutého "vazu" keramické pěny (Al_2O_3).

(Colombo, 2005)

Druhou nejpoužívanější metodou je metoda přímého zpěňování (obr. 7 a, b), které je svým způsobem velmi podobné metodám výroby kovových a polymerních pěn. I zde

dochází k vmíchání plynu do keramické suspenze, a to buď přímým vstřikováním plynu, přidáním pevného nebo kapalného pěnidla, či tzv. metodou in situ, kdy dochází ke vzniku bublinek plynu v suspenzi chemickou reakcí. Přímé zpěňování umožňuje výrobu keramických pěn s póry otevřenými i uzavřenými o velikosti 35 μm až 1,2 mm. Navíc oproti replikační metodě není struktura pěny dutá, což ve výsledku zvyšuje její mechanické vlastnosti (Colombo, 2005).

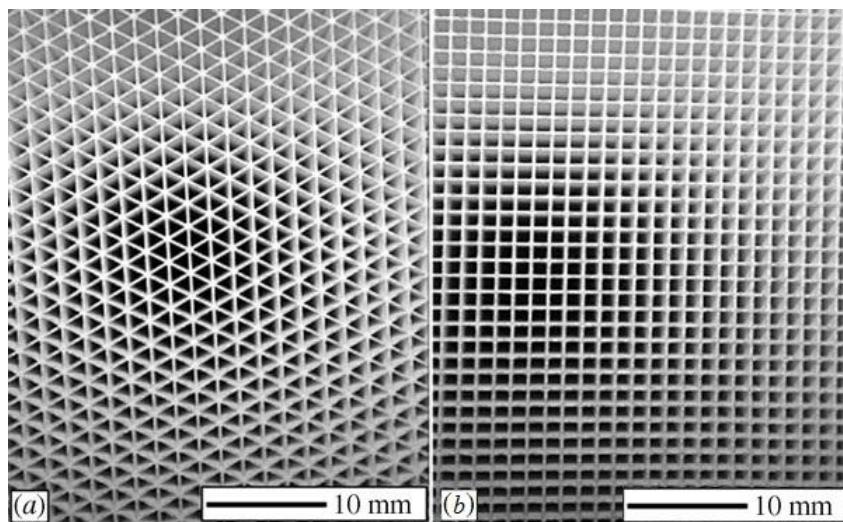
Porézní strukturu lze také získat metodou vypálení částic, které slouží jako předloha pórů (obr. 4 c). Princip spočívá v zalití kuliček či jiných komponent (mohou být z polymeru (nejčastěji PMMA, PS, PVC), vosku, škrobu nebo pilin) keramickou suspenzí a jejich následným vypálením. Tímto jsou částice nahrazeny dutinami a vznikne porézní struktura (Colombo, 2005).



Obr. 7: SEM snímky (a) struktury hydroxyapatitové keramické pěny vyrobené přímým zpěňováním; (b) detailu "vazu" keramické pěny vyrobené přímým zpěňováním; (c) struktury SiOC keramické pěny vyrobené metodou vypálení polymerních kuliček o průměru 25 μm .

(Colombo, 2005)

Zvláštním případem jsou tzv. honeycomby, neboli porézní materiály s pravidelnou strukturou - viz obr. 8. Jejich výroba spočívá ve vytlačování keramického prášku v požadovaném tvaru a následném slinování. Keramický prášek bývá nejčastěji karbid křemíku (SiC), nebo cordierit. Takto vyrobené honeycomby se poté nejčastěji používají jako filtry či katalyzátory (Colombo, 2005).



Obr. 8: Snímky z optického mikroskopu příčného řezu keramických (cordieritových) honeycombů se strukturou (a) trojúhelníkovou; (b) čtvercovou.

(Colombo, 2005)

2.3 Přírodní porézní materiály

V předchozích kapitolách bylo ukázáno, že existuje mnoho moderních technologií, díky kterým je člověk v dnešní době schopen vyrobit široké spektrum porézních struktur z různých materiálů. Stále se však tyto metody a postupy vyznačují velkou energetickou a materiálovou náročností. Je zapotřebí vysokých teplot a dodržení přísných a složitých postupů. Zatím však nejsme schopni dosáhnout struktur takové variability a kvality a za takových technologických podmínek, jaké můžeme najít téměř všude kolem nás.

Porézní struktura v přírodních materiálech je více než důležitá a pro většinu organismů je klíčová pro jejich bezpečný růst a vývoj. Například u semen rostlin, či vajec živočichů jsou tyto výhody porézní struktury očividné. V první řadě poskytují dostatečně pevnou a odolnou schránku, která je díky porézní struktuře velmi lehká. V případě vzniku praskliny pak samotné póry brání v jejím dalším šíření. V druhé řadě pak tato

struktura umožňuje bezpečnou výměnu látek mezi okolím a vnitřním prostředím, což je pro jejich vývoj velmi důležité. Další, a možná v přírodě nejvíce využívanou výhodou porézních struktur, je nízká hmotnost materiálu, který si ovšem stále zachovává pevnost materiálu celistvého. Příkladem mohou být lidské a zvířecí kosti, dřevo, skelety živočichů, aj. Navíc zde póry opět fungují jako překážka při vzniku a šíření trhliny.

Dalších příkladů, využívajících těchto, či jiných výhod porézních struktur, lze v přírodě nalézt téměř všude. Vždy se jedná o konkrétní model, který byl evolucí a postupným vývojem doveden k dokonalosti.

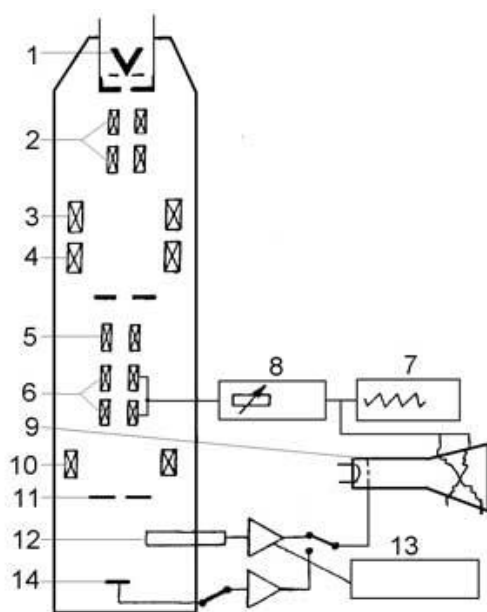
3 Experimentální část

Cílem bakalářské práce byl výběr deseti vzorků přírodních porézních materiálů, zpracování detailních snímků jejich porézní struktury na rastrovacím elektronovém mikroskopu a porovnání porézních struktur těchto přírodních materiálů s porézními materiály vyrobenými člověkem.

3.1 Elektronová mikroskopie

Elektronový mikroskop je, stejně jako mikroskop optický, přístroj, který slouží k získání zvětšeného obrazu pozorovaných objektů. Oproti optickému mikroskopu, který pro zvětšení využívá viditelné světlo a skleněné čočky, je u elektronového mikroskopu využito svazků urychlených elektronů a čoček elektromagnetických. Využití elektronového záření, které má vlnovou délku v rozmezí 0,01 až 0,001 nm (viditelné světlo má vlnovou délku 400 až 700 nm), umožňuje dosáhnout až 1 000 000x zvětšení (optický mikroskop dosahuje běžně až 1 000x zvětšení). Navíc je možné z mnoha dalších signálů, které vznikají po dopadu urychlených elektronů na povrch vzorku, zjistit informace jako chemické složení, krystalografii, mikrostrukturu, aj (www.fzu.cz).

Z hlediska typů elektronových mikroskopů běžně rozlišujeme 2 typy, a to rastrovací elektronový mikroskop (SEM - Scanning Electron Microscope) a transmisní elektronový mikroskop (TEM - Transmission Electron Microscope). V zásadě se liší tím, že SEM využívá odražené primární a emitované sekundární elektrony, kdežto TEM primární elektrony, které vzorkem prošly. SEM se využívá pro zobrazení a analýzu libovolných vodivých povrchů (nevodivé vzorky se naprašují, např. zlatem), nicméně výsledné zvětšení není tak velké. TEM poskytuje větší zvětšení a používá se nejčastěji pro pozorování vnitřní struktury vzorku. Nevýhodou je však složitější příprava vzorků (jejich tloušťka musí být cca do 500 nm) (www.fzu.cz).



Obr. 9: Schéma rastrovacího elektronového mikroskopu (SEM):

- 1 - Elektronová tryska,
- 2 - cívky pro seřízení elektronového paprsku,
- 3 - kondenzor I,
- 4 - kondenzor II,
- 5 - stigmátor,
- 6 - rastrovací cívky,
- 7 - generátor,
- 8 - regulace zvětšení,
- 9 - obrazovka,
- 10 - objektiv,
- 11 - aperturní clona,
- 12 - detektor,
- 13 - videozesilovač,
- 14 - preparát.

(www.med.muni.cz)

Pro získání snímků přírodních objektů bylo použito rastrovací elektronové mikroskopie (SEM). Princip, jak název vypovídá, spočívá v řádkování úzkého elektronového svazku pomocí vychylovacích systémů a následném zobrazení pozorovaného místa na monitoru z informací získaných ze zpětně odražených primárních a emitovaných sekundárních elektronů v jednotlivých bodech rastru (www.med.muni.cz). Pozorování bylo prováděno na dvou přístrojích, a to konkrétně na Carl Zeiss Ultra Plus a Tescan Vega XMU. Jelikož jsou vzorky v mikroskopu uloženy ve vakuové komoře, musely být rostlinné vzorky vysušeny. Všechny vzorky byly před pozorováním pokoveny zlatem ve speciálním naprašovacím přístroji Quorum Q15R ES, což zajistilo jejich vodivý povrch pro pozorování. Snímky byly pořizovány v sérii zvětšení 50x, 100x, 250x, 500x, výjimečně 1000x a 2500x.

3.1 Vybrané přírodní materiály

Pro pozorování byly vybrány vzorky těchto přírodních materiálů: skelet a zub ježovky černé (*Arbacia lixula*), skelet ježovky srdcové (*Echinocardium cordatum*), sépiová kost

(*Sepia officinalis*), skořápka vejce kura domácího (*Gallus gallus domesticus*), stoněk šáchoru střídavolistého (*Cyperus alternifolius*), stoněk sítiny rozkladité (*Juncus effusus* L.), stoněk bezu černého (*Sambucus nigra*, L.), kůra borovice lesní (*Pinus sylvestris*, L.) a vysušený vnitřní skelet (endoskelet) mořské houby (*Spongia officinalis*).

3.1.1 Skelet a zub ježovky černé

Ježovky (obr. 10), latinsky echinoidea, jsou mořští živočichové, patřící do kmene ostnokožců. Mají tělo kulovitého tvaru o průměru 3 až 10 cm, které je před okolím chráněno vápenitou schránkou, navíc pokrytou dlouhými ostny. Ježovky obývají mořská a oceánská dna po celém světě až do hloubky 5000m. Živí se převážně mořskými řasami, které "okusují" z povrchu kamenů a korálů. Z pohledu bioniky jsou to velmi zajímaví živočichové a čerpat inspiraci lze z mnoha jejich částí, nicméně v rámci porézních materiálů je nejzajímavější skelet a zuby (Wikipedia, 2012).

Pro pozorování byl vybrán skelet a zub ježovky černé, patřící do řádu Arbacioidea, latinským názvem *Arbacia lixula*. Jedná se o velmi často se vyskytující druh zejména ve Středozemním moři a v okolí Makronéských ostrovů v hloubce do 30 m (Wikipedia, 2012).

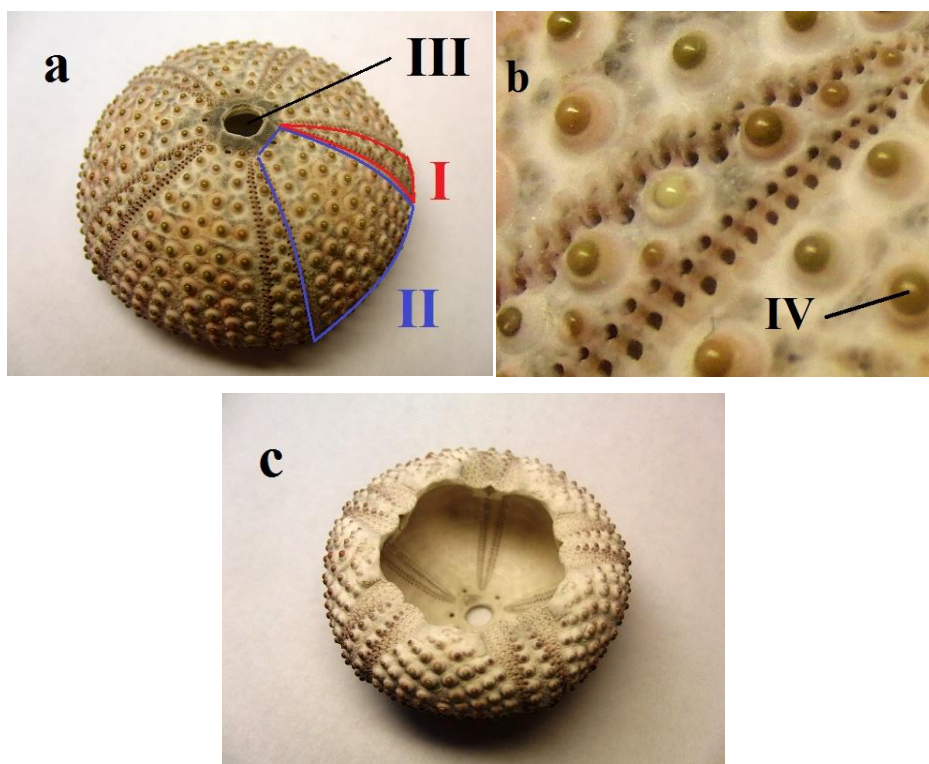


Obr. 10: Snímek živé ježovky černé.

(www.seadb.net)

Skelet ježovky černé

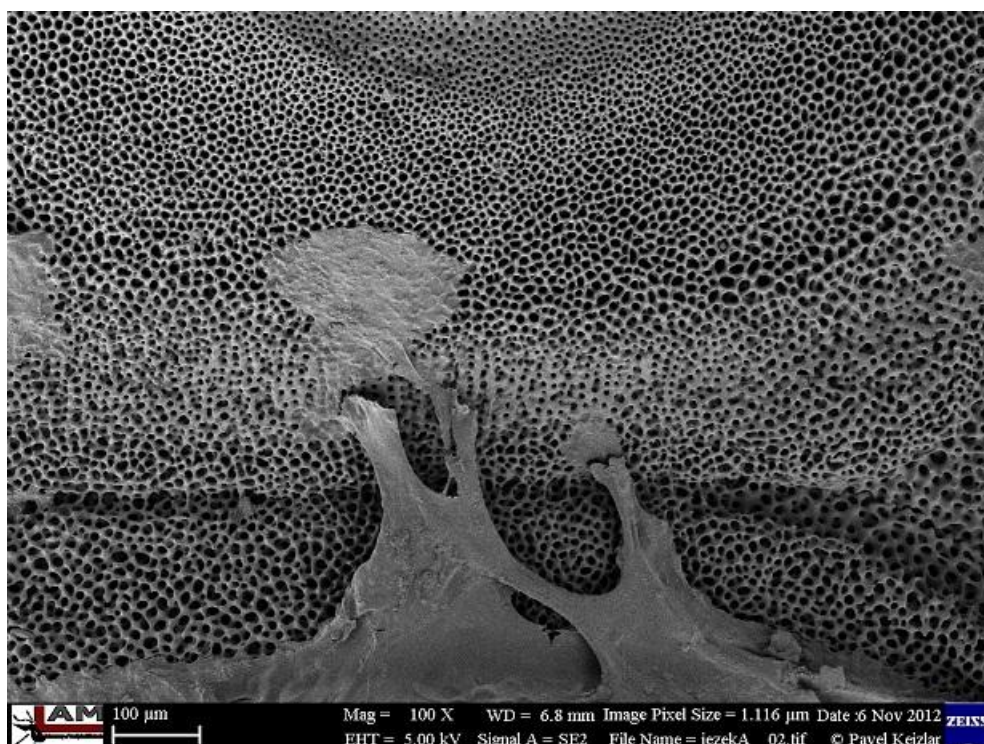
Samotný skelet je pevná schránka kulovitého tvaru (obr. 11 a), která je tvořena spojenými vápenitými "kůstkami". Celý skelet je po obvodu tvořen dvěma střídajícími se typy destiček, kterých je celkem deset. První typ jsou tzv. ambulakrale (I), které obsahují řady otvorů pro panožky (obr. 11 b). Druhým typem destiček jsou tzv. interambulakrale (II), které jsou větší a jsou na nich napojeny ostny. Samotné ostny jsou ke schránce připojeny pomocí tzv. primárních a sekundárních artikulačních bradavek (IV), které pomocí svalů umožňují volný pohyb jednotlivých ostnů. Na spodní straně se poté u živé ježovky nachází ústní otvor (obr. 7 c), a na vrcholu otvor vylučovací (III) (Katedra Zoologie, Univerzita Palackého v Olomouci, 2010).



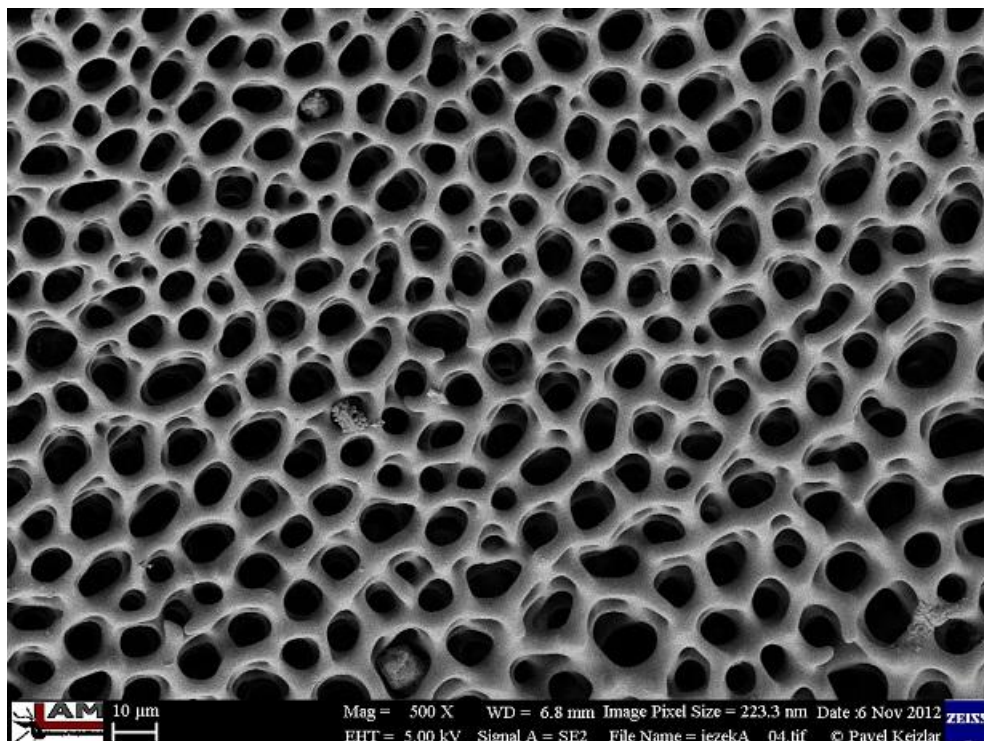
Obr. 11: Snímky (a) celého skeletu; (b) detailu ambulakrale a artikulačních bradavek; (c) spodní části skeletu ježovky černé.

(Foto - archiv autora)

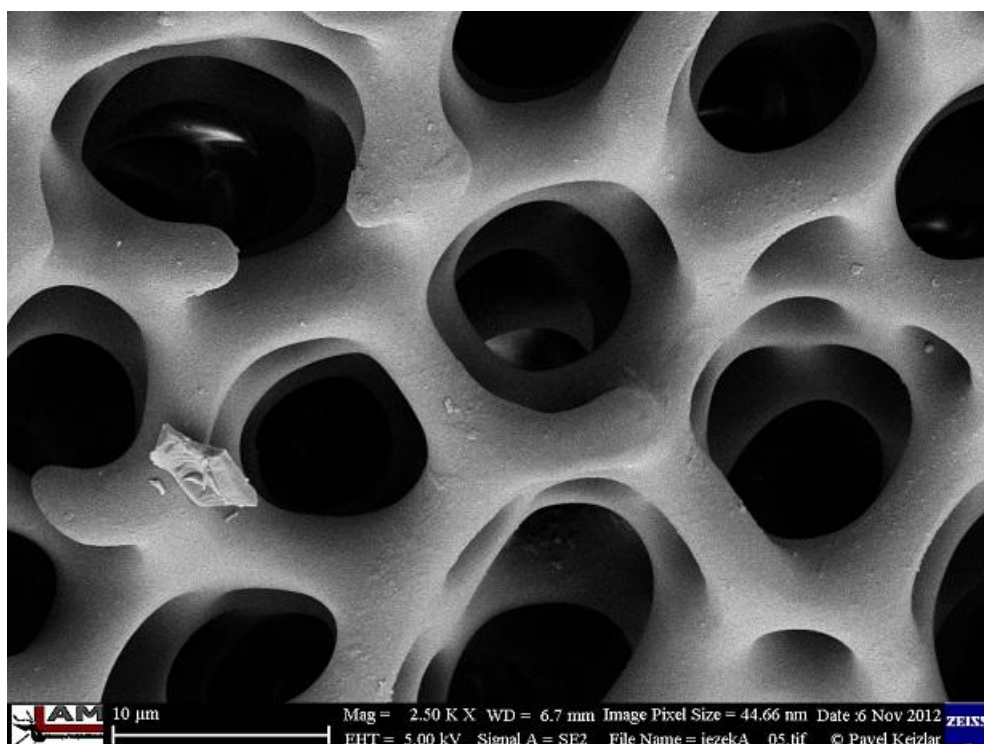
Při pohledu na snímky z elektronového mikroskopu (obr. 12, obr. 13 a obr. 14) je patrná porézní struktura skeletu jak z části vnější, tak z části vnitřní. Část vnější je tvořena otevřenými póry kruhového tvaru, jejichž velikost se pohybuje okolo 10 μm . Jednotlivé póry jsou od sebe vzdáleny cca 4 μm .



Obr. 12: Snímek vnějšího povrchu skeletu ješovky černé (zvětšeno 100x).
(SEM - TUL)

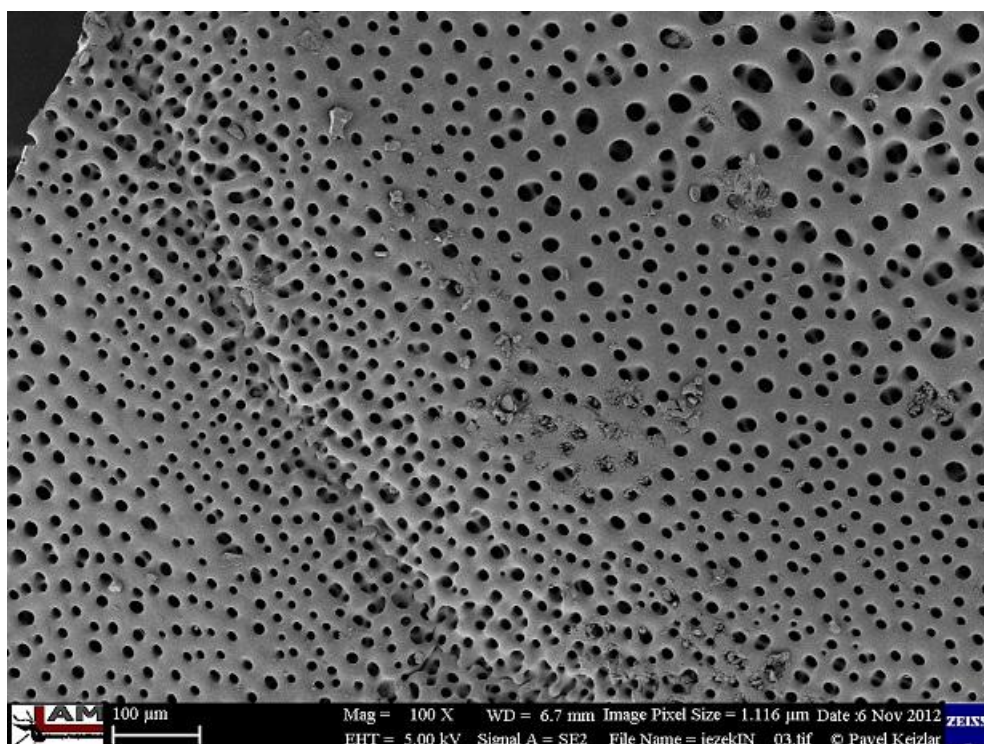


Obr. 13: Snímek vnějšího povrchu skeletu ješovky černé (zvětšeno 500x).
(SEM - TUL)

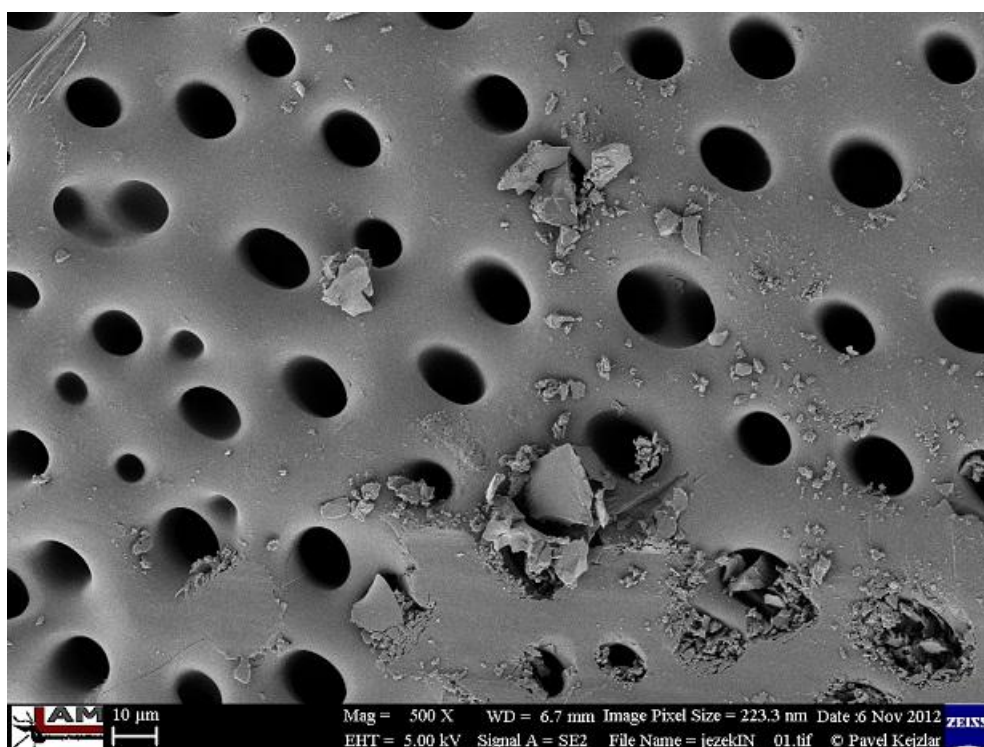


Obr. 14: Snímek vnějšího povrchu skeletu ježovky černé (zvětšeno 2 500x).
(SEM - TUL)

Póry na vnitřní straně skeletu (obr. 15 a obr. 16) jsou stejného oválného tvaru a jejich velikost je přibližně také stejná, tedy cca 10 μm . Vnitřní strana skeletu se oproti straně vnější ovšem liší v množství pórů na jednotku plochy, neboli ve vzdálenosti mezi jednotlivými póry. Zde je vzdálenost větší, a to v rozmezí 10 až 20 μm .



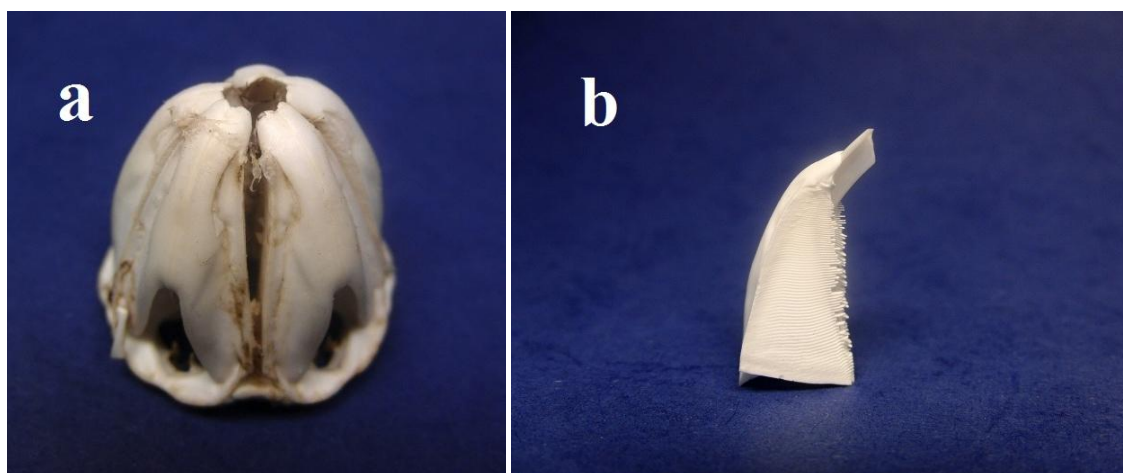
Obr. 15: Snímek vnitřního povrchu skeletu ježovky černé (zvětšeno 100x).
(SEM - TUL)



Obr. 16: Snímek vnitřního povrchu skeletu ježovky černé (zvětšeno 500x).
(SEM - TUL)

Zub ježovky černé

Jak bylo psáno výše, mořské ježovky se živí řasami, které "okusují" z kamenů. Aby toto mohly provozovat dlouhodobě, vyvinula se u jejich zubů speciální vlastnost, neboli samoostření. Při "okusování" tvrdého kamene se špičky zubů sice neustále obrušují, ale zároveň zuby v kořenové části opět dorůstají. Je to tedy stále se opakující koloběh (Wang, Addadi a Weiner, 1997).

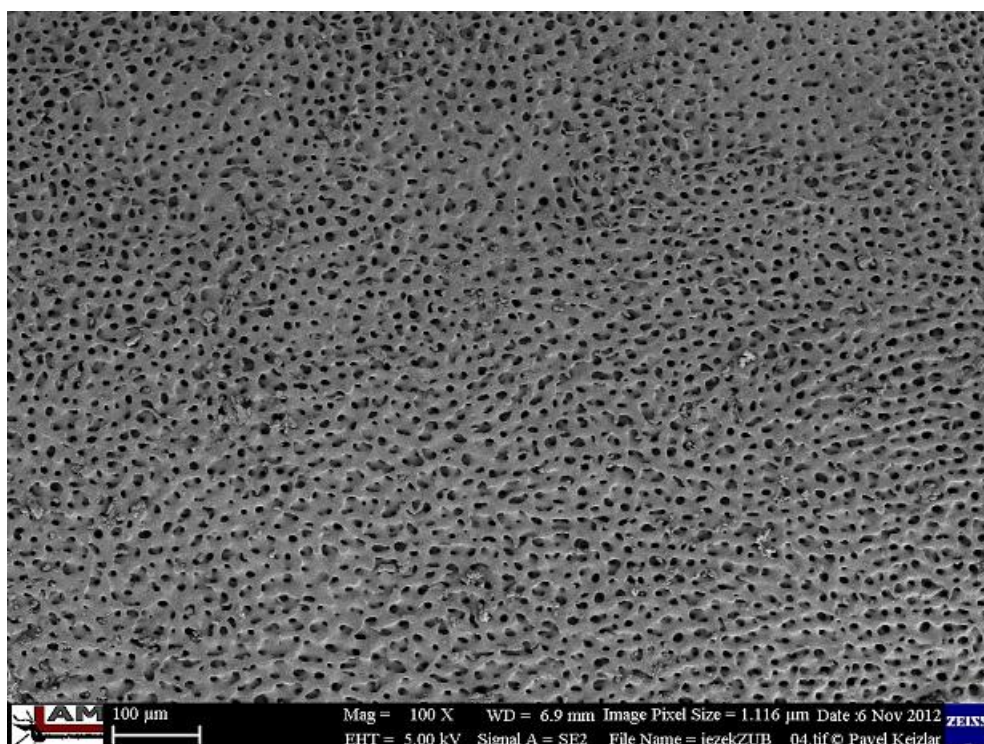


Obr. 17: Snímky (a) aristotelovy lucerny; (b) zubu ježovky černé.

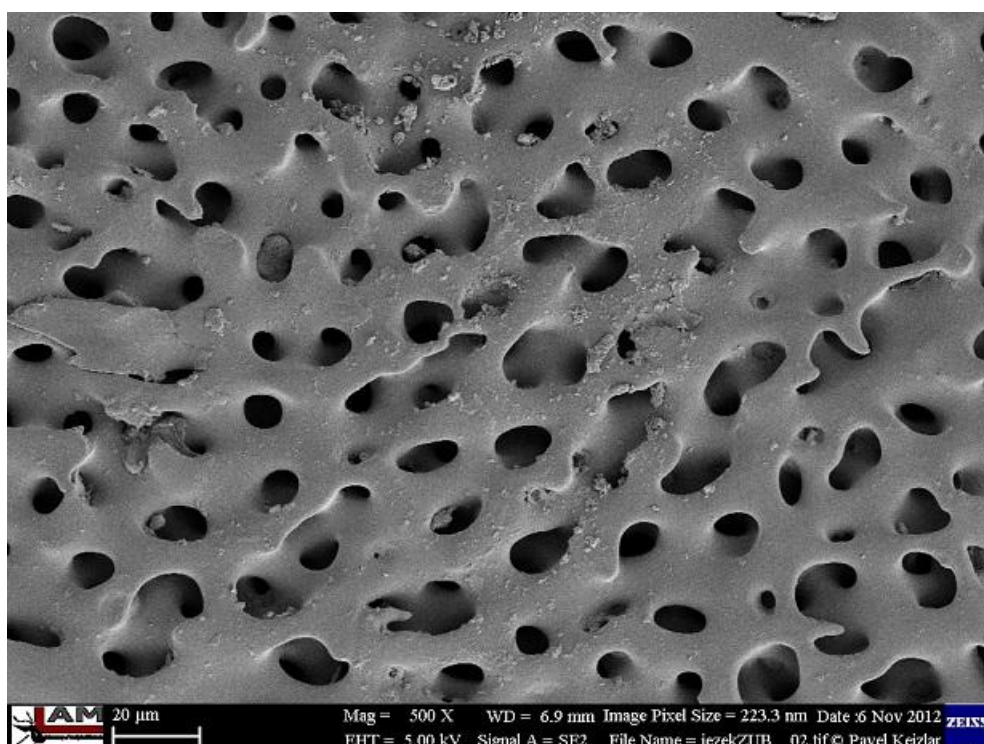
(Foto - archiv autora)

Samotné ústrojí v ústním otvoru se nazývá Aristotelova lucerna (obr. 17 a). Je tvořena pěti zuby, které jsou spojené pomocí vápenitých destiček a svalů. Zub (obr. 17 b) je možné rozdělit na 3 části podle jejich funkce, a to na tzv. žvýkací část (špička zubu, která přichází do kontaktu s kameny, korály, apod.), střední část (je připojena k destičkám, které drží všechny zuby pohromadě) a kořenovou část (zde dochází k růstu nových částí zubu).

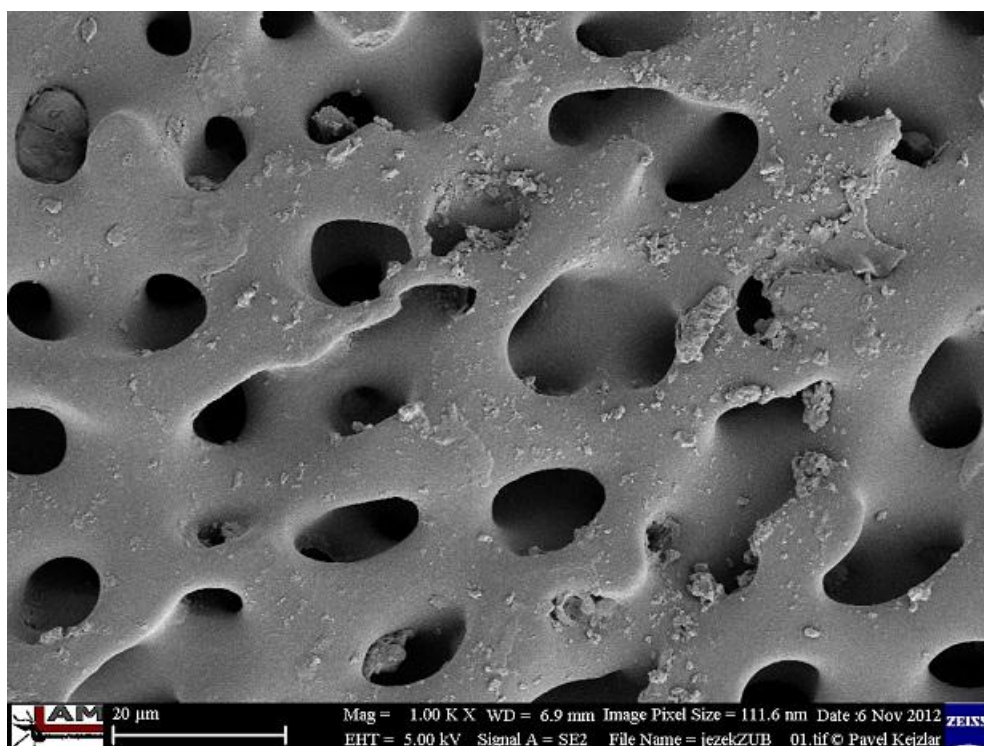
Snímky z elektronového mikroskopu (obr. 18, 19 a 20) ukazují porézní strukturu velmi podobnou vnitřní straně skeletu ježovky. Velikost a tvar pórů je přibližně stejný, i když zde jsou póry spíše tvaru elipsy. Oproti vnitřní části skeletu je zde ale patrná větší pórovitost. Vzdálenost mezi jednotlivými póry se pohybuje v rozmezí 5 až 15 μm .



Obr. 18: Snímek zubu ježovky černé (zvětšeno 100x).
(SEM - TUL)



Obr. 19: Snímek zubu ježovky černé (zvětšeno 500x).
(SEM - TUL)



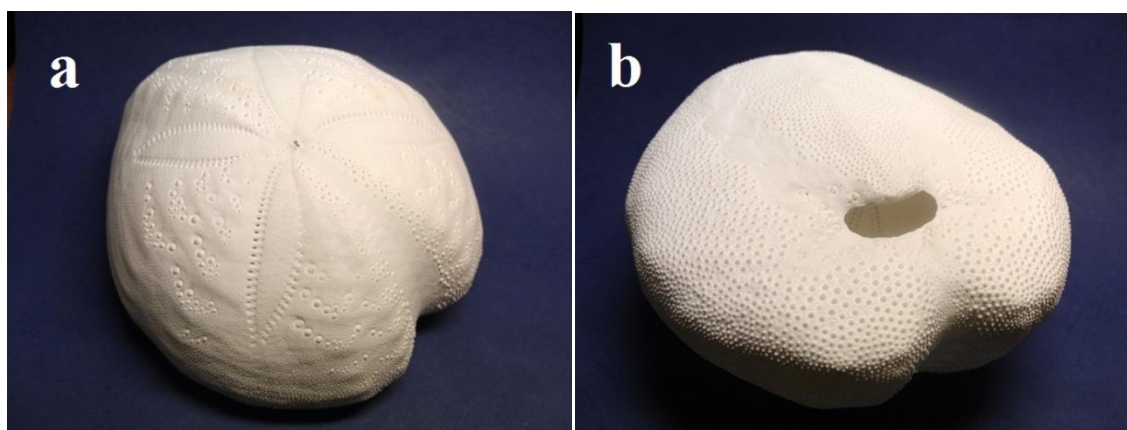
Obr. 20: Snímek zubu ježovky černé (zvětšeno 1000x).
(SEM - TUL)

3.1.2 Skelet ježovky srdcové



Obr. 21: Snímek živé ježovky srdcové.
(www.divegallery.com)

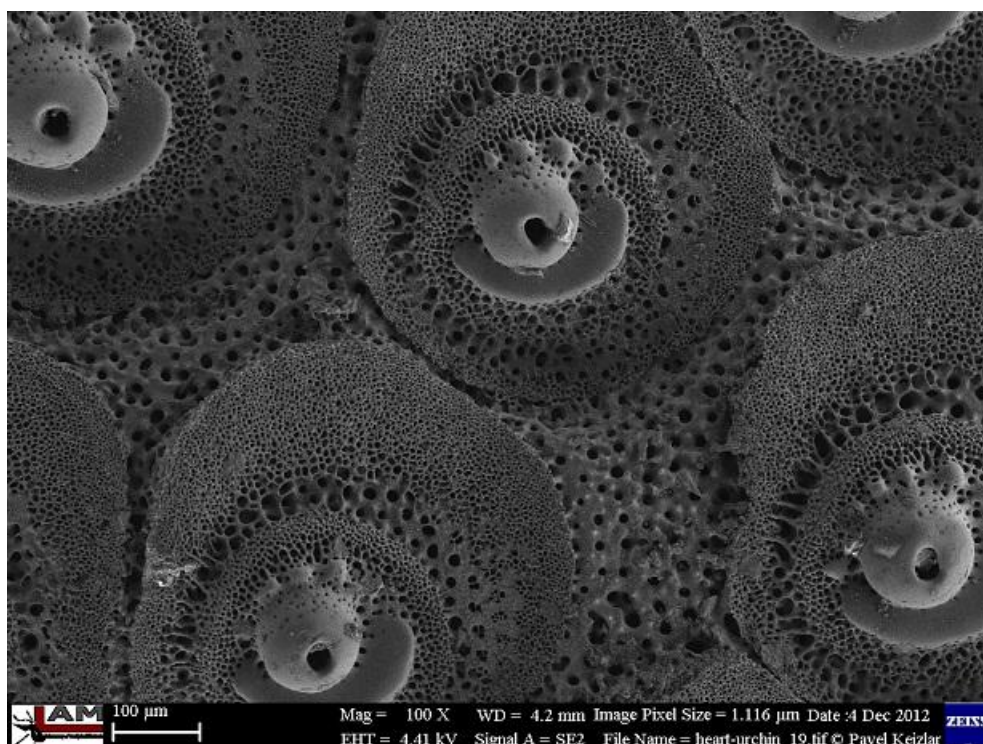
Ježovka srdcová (obr. 21) patří, stejně jako ježovka černá, do třídy Echinoidea, ale její řád se nazývá Spatangoida. Druhové jméno "srdcová" si získala díky tvaru skeletu (obr. 22 a, b). Ten není jako u ježovky černé dokonale oválný, ale spíše připomíná srdce. To je dáno menším protažením zadní části skeletu a drážkou v části přední. Tzv. ambulakrální část, obsahující řady otvorů pro panožky, je zde ve tvaru hvězdice. Ostny, připevněné stejně jako u ježovky černé (pomocí artikulačních bradavek), zde slouží spíše pro zachytávání bublinek vzduchu, jelikož ježovka srdcová tráví většinu času zahrabána v písčitém dně, kde se živí zbytky organismů (Wikipedia, 2012).



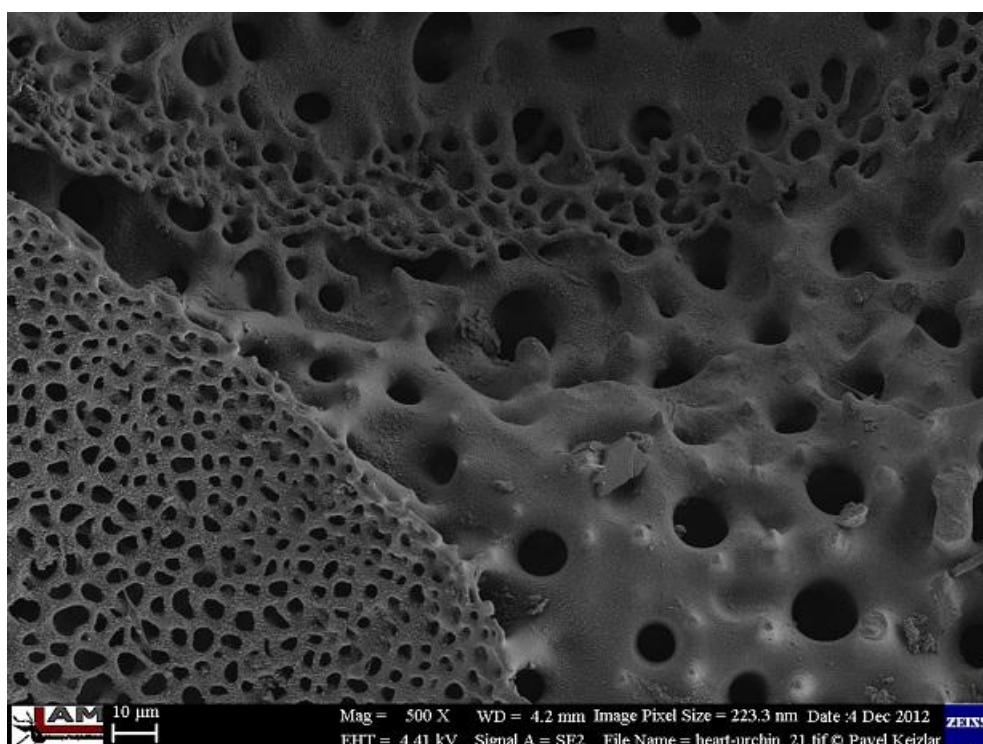
Obr. 22: Snímky (a) horní části skeletu (s patrnou hvězdicovitou ambulakrální částí);
(b) spodní části skeletu ježovky srdcové.

(Foto - archiv autora)

SEM snímky vnější části skeletu (obr. 23 a 24) odhalují členitý porézní povrch, na kterém se nacházejí artikulační bradavky v podobě ostrůvků s odlišnou pórovitostí a se zaoblenými výstupky. Póry povrchu mezi ostrůvky mají pravidelný kruhový tvar, jejich průměr se pohybuje v rozmezí 10 až 16 μm a mezi sebou jsou vzdálené 10 až 20 μm . Na artikulačních bradavkách se pórovitost v různých částech mění. Na okrajích jsou póry velmi malé, o průměru cca 2 μm , nepravidelného tvaru, jejichž vzájemná vzdálenost je 1 až 2 μm . Následuje pás pórů stejných jako jsou mezi ostrůvky a směrem ke středu jsou póry opět malé.

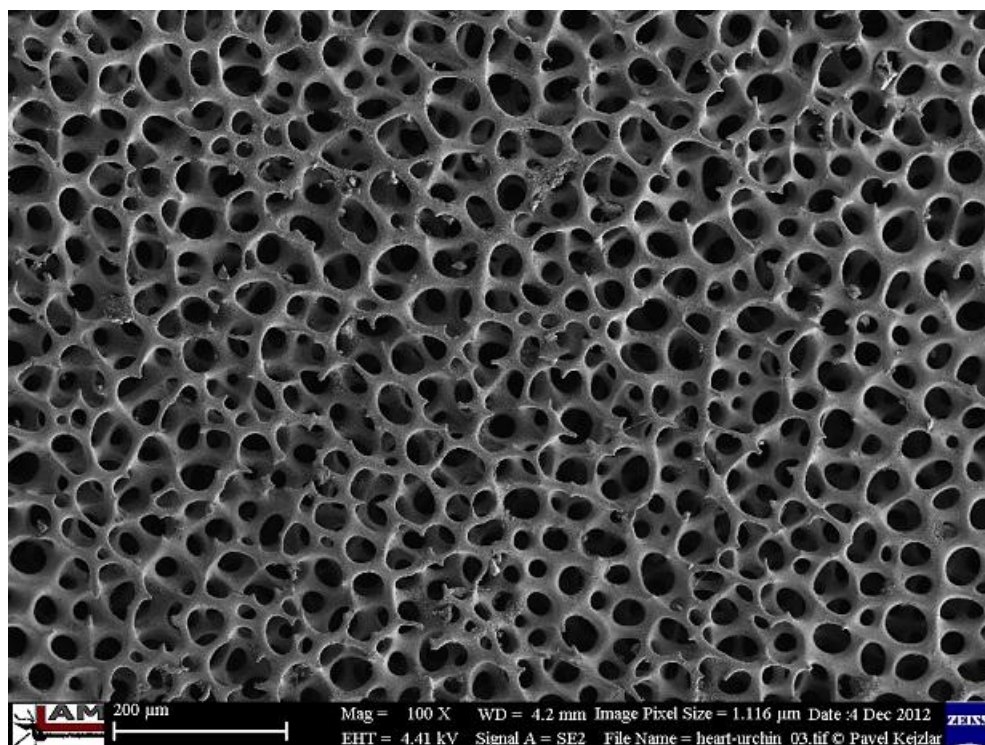


Obr. 23: Snímek vnější části skeletu ježovky srdcové (zvětšeno 100x).
(SEM - TUL)

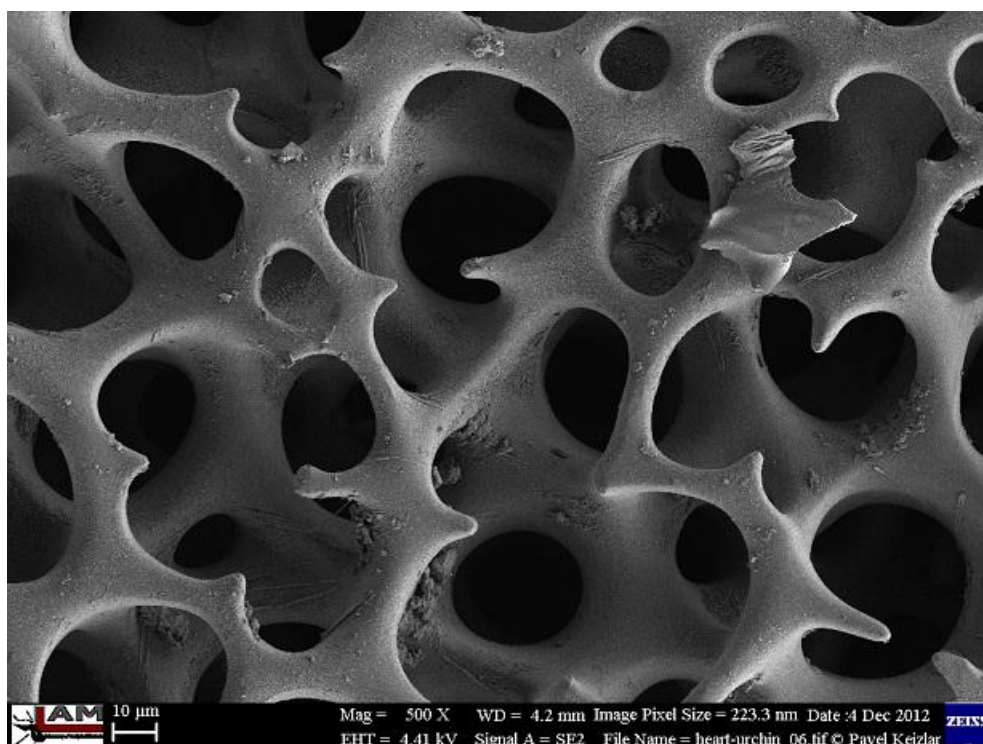


Obr. 24: Snímek vnější části skeletu ježovky srdcové (zvětšeno 500x).
(SEM - TUL)

Vnitřní povrch skeletu (obr. 25 a 26) je tvořen póry většími, o průměru v rozmezí 20 až 40 μm . Jejich vzájemná vzdálenost je cca 10 až 25 μm a jsou oválného tvaru. Na povrchu jsou patrné nedokončené póry ve formě špičatých výstupků.



Obr. 25: Snímek vnitřní části skeletu ježovky srdcové (zvětšeno 100x).
(SEM - TUL)



Obr. 26: Snímek vnitřní části skeletu ježovky srdcové (zvětšeno 500x).
(SEM - TUL)

3.1.3 Sépiová kost

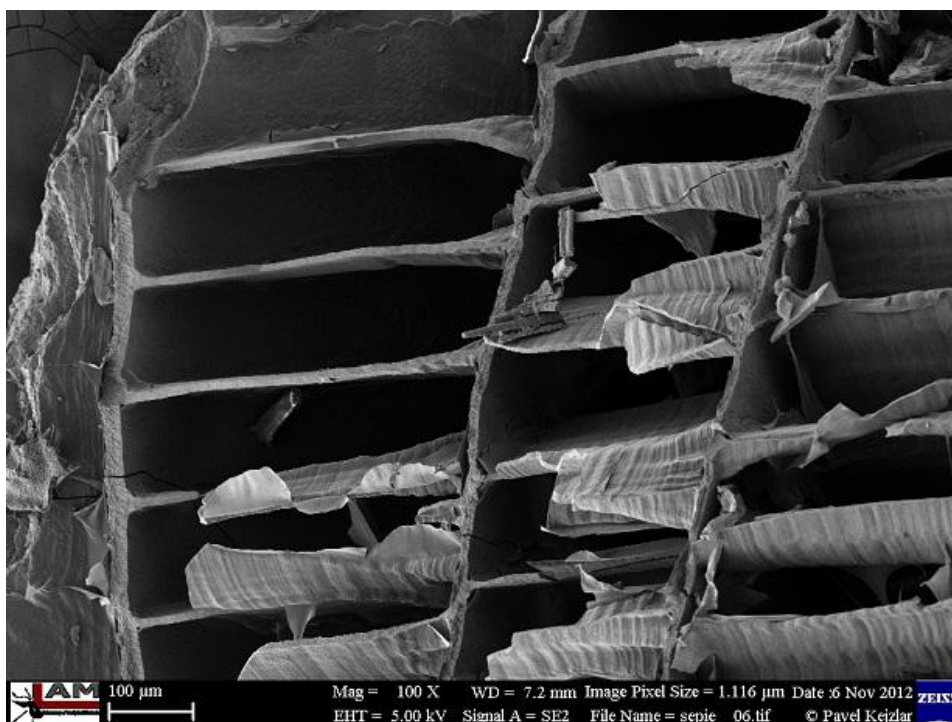
Sépiová kost (obr. 27 b) je speciální útvar, který slouží dravým mořským hlavonožcům řádu sépie (latinsky Sepiida) (obr. 27 a) jako opora těla, a zároveň díky její pórovité struktuře jako nástroj pro vyrovnávání hydrostatického vztlaku, a tím umožňovat volné vznášení sépie v různých hloubkách (podobná funkce jako plynový měchýř u ryb). Pórovitá část, umožňující vznášení, se nazývá "fragmokon" a je tvořena převážně uhličitánem vápenatým - CaCO_3 ve formě aragonitu. Struktura je složena z oddělených komůrek, které jsou vyplněny jak kapalinou, tak plynem (převážně dusíkem). Sépie pak mění svou hustotu jednoduše změnou množství kapaliny v komorách fragmokonu a to jí umožňuje se vznášet. Nicméně díky pórovité struktuře, naplněné plynem, je jejich životní prostor omezen do maximální hloubky cca 600 m (záleží na druhu) (Wikipedia, 2012). Pro představu, v hloubce 70 m může být rozdíl tlaku mezi okolím a vnitřkem sépiové kosti až 0,7 MPa. Musí tedy být strukturálně velmi pevná a silná, ale zároveň lehká, aby sépii nijak neomezovala (Birchall a Thomas, 1983).



Obr. 27: (a) Obrázek sépie obecné; (b) snímek sépiové kosti.

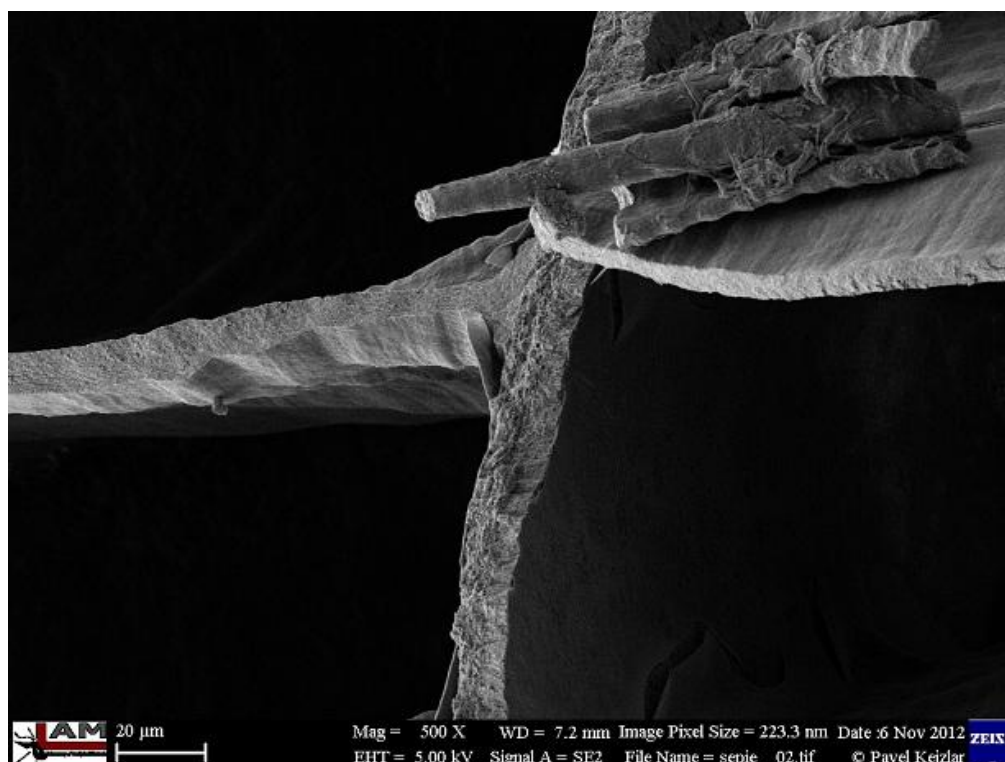
((a) www.globefish.org; (b) Foto - archiv autora)

Na snímcích z elektronového mikroskopu (obr. 28 a 29) jsou dobře vidět jednotlivé komory, ze kterých se frammokon skládá. V celém průřezu je tvořen patry, která jsou vyztužena svislými stěnami. Samotné komory jsou pak pravidelného obdélníkového tvaru. Celá struktura je velmi podobná honeycombům, které se vyrábějí v technické praxi. Tloušťka stěn jednotlivých komor frammokonu se pohybuje v rozmezí od 5 do 15 μm .



Obr. 28: Snímek vnitřní struktury sépiové kosti (zvětšeno 100x).

(SEM - TUL)



Obr. 29: Snímek detailu stěn komor tvořících vnitřní strukturu sépiové kosti
(zvětšeno 500x).
(SEM - TUL)

3.1.4 Skořápka vejce kura domácího

Vejce, konkrétně jejich stavba, struktura a materiál, hrají v životě vejcorodých živočichů velmi důležitou roli. Jejich hlavní funkcí je ochránit uvnitř rostoucí plod před okolím, ale zároveň ho s okolím spojovat a umožňovat vzájemnou látkovou výměnu. Je tedy jasné, že zde nalezneme porézní strukturu, která toto umožňuje.

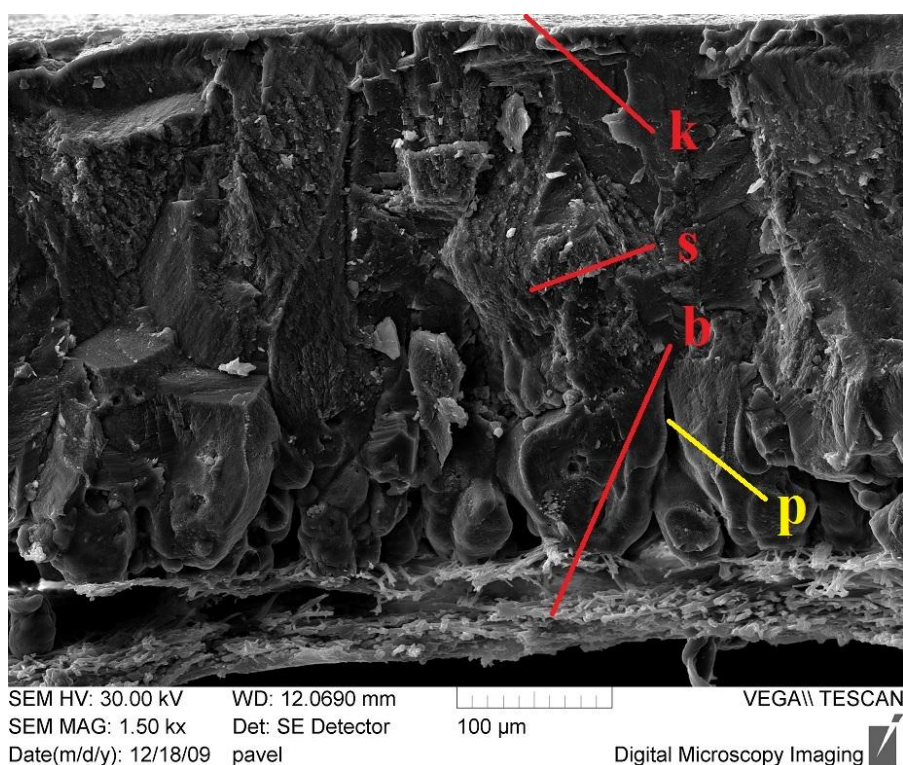


Obr. 30: Kur domácí.
(www.hen.com)



Obr. 31: Vejce kura domácího.
(Foto - archiv autora)

Skořápka vejce kura domácího, stejně jako ostatních ptáků, se skládá ze tří vrstev, kterými jsou kutikula (obr. 32 k), skořápka (obr. 32 s) a vnitřní blána (obr. 32 b). Kutikula je tenká (cca 2 μm) elastická vnější vrstvička skořápky, která zlepšuje její mechanické vlastnosti. Těsně pod kutikulou se nachází nejsilnější část (cca 200 μm), tedy vlastní skořápka. Tato krystalická vrstva obsahuje velmi důležité póry, které slouží k již zmiňované látkové výměně s okolím, a zároveň je dostatečně pevná, aby vejce ochránila (pórovitá struktura pomáhá zabránit šíření případných trhlin). Třetí vrstva, nacházející se na vnitřní straně skořápky, se nazývá vnitřní blána. Její tloušťka se pohybuje okolo 50 až 60 μm a je tvořena vlákny, která se navzájem kříží a tvoří vrstvy, čímž vytvářejí jakousi pórovitou strukturu. Zároveň tato vrstva slouží jako základna pro rostoucí krystaly vlastní skořápky (Zhang, Wang a Ma, 2005). Celá skořápka je převážně tvořena uhličitanem vápenatým CaCO_3 (89 až 97 %), dále pak uhličitanem hořečnatým MgCO_3 (2 %) a fosforečnanem vápenatým $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ a hořečnatým $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ (0,5 až 5 %) (Wikipedia, 2012).

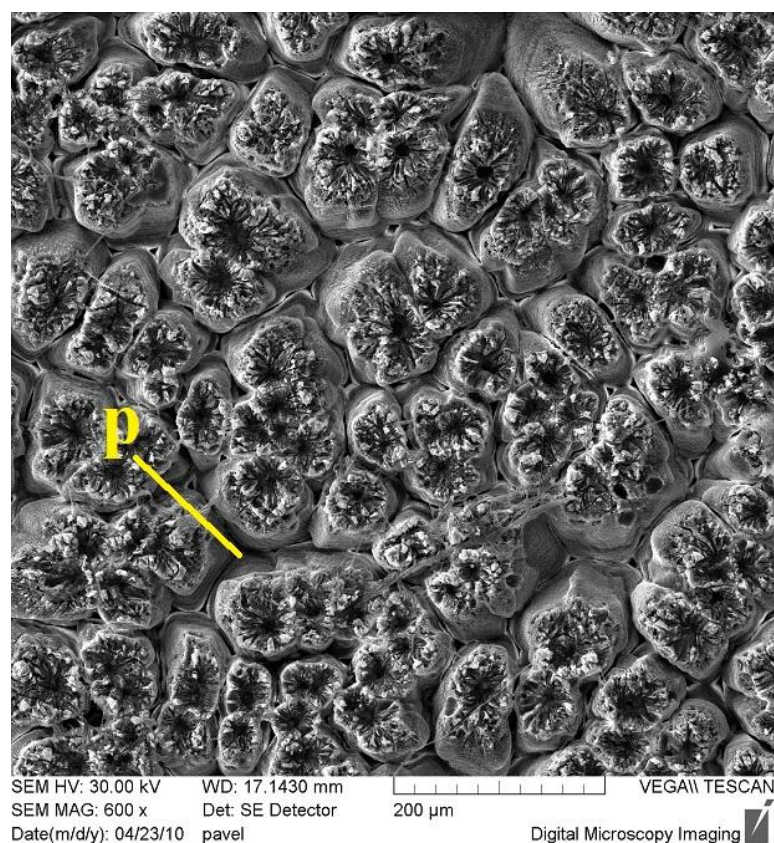


Obr. 32: Snímek příčného lomu skořápky vejce kura domácího:

(k) kutikula; (s) skořápka; (b) vnitřní blána (zvětšeno 1 500x).

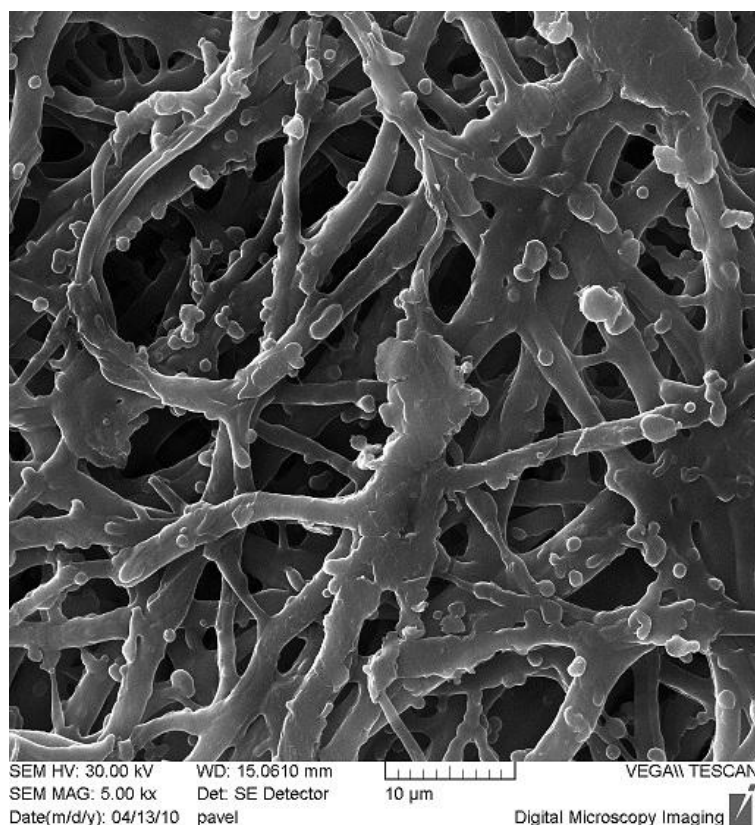
(SEM - TUL)

Snímky z elektronového mikroskopu odhalují jednotlivé oválné pilíře, kterými je skořápka tvořena (obr. 32 a 33). Samotné póry (p) se nacházejí právě mezi těmito jednotlivými pilíři a jejich průměr se pohybuje okolo 5 μm .



Obr. 33: Snímek vnitřní části skořápky bez vnitřní blány (zvětšeno 600x).
(SEM - TUL)

Na SEM snímcích vnitřní blány jsou patrná různoběžná vlákna (obr. 34). Jsou navzájem spojená a tvoří jakousi síť, která má několik vrstev. Tloušťka vláken je cca 2 μm .



Obr. 34: Snímek struktury vnitřní blány (zvětšeno 5 000x).
(SEM - TUL)

3.1.5 Stonek šáchoru střídavolistého

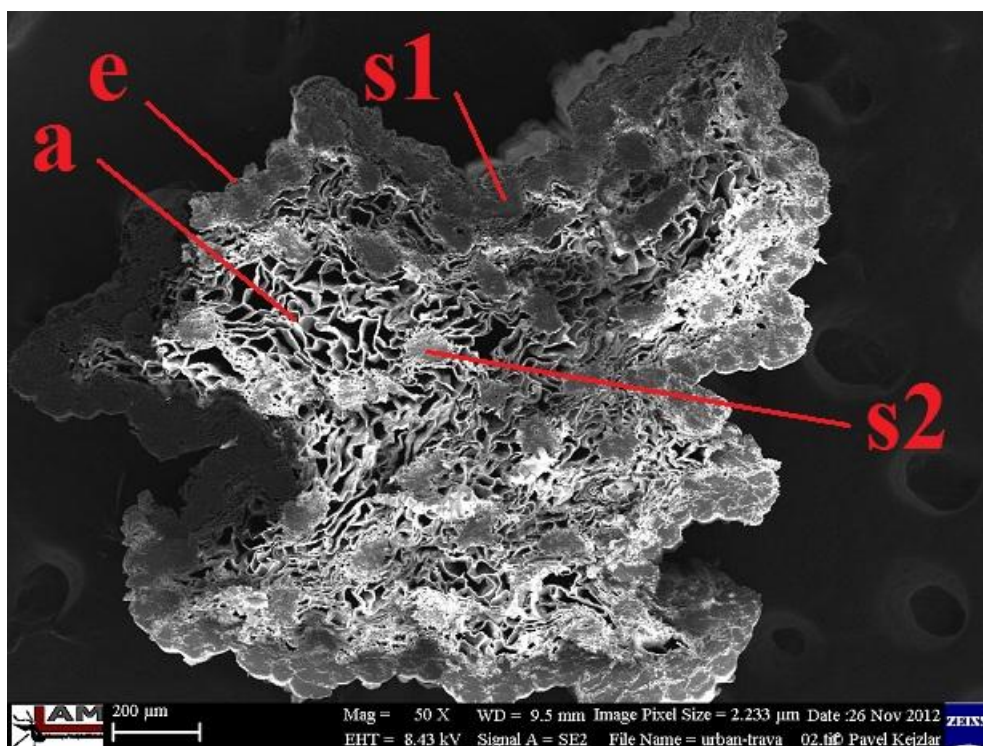
Šáchor střídavolistý (latinsky *Cyperus alternifolius*) (obr. 35) je druh bahenní rostliny z čeledi šáchorovitých (latinsky *Cyperaceae*). Pochází z Madagaskaru a vyniká především svým dlouhým rovným stonkem, který může dosahovat výšky až 170 cm (jiné druhy šáchoru až 5 m) aniž by obsahoval různé vyztužující klouby či přepážky (jako například bambus). Proto byl stonek šáchoru střídavolistého vybrán mezi pozorované přírodní objekty (www.rostliny.net).



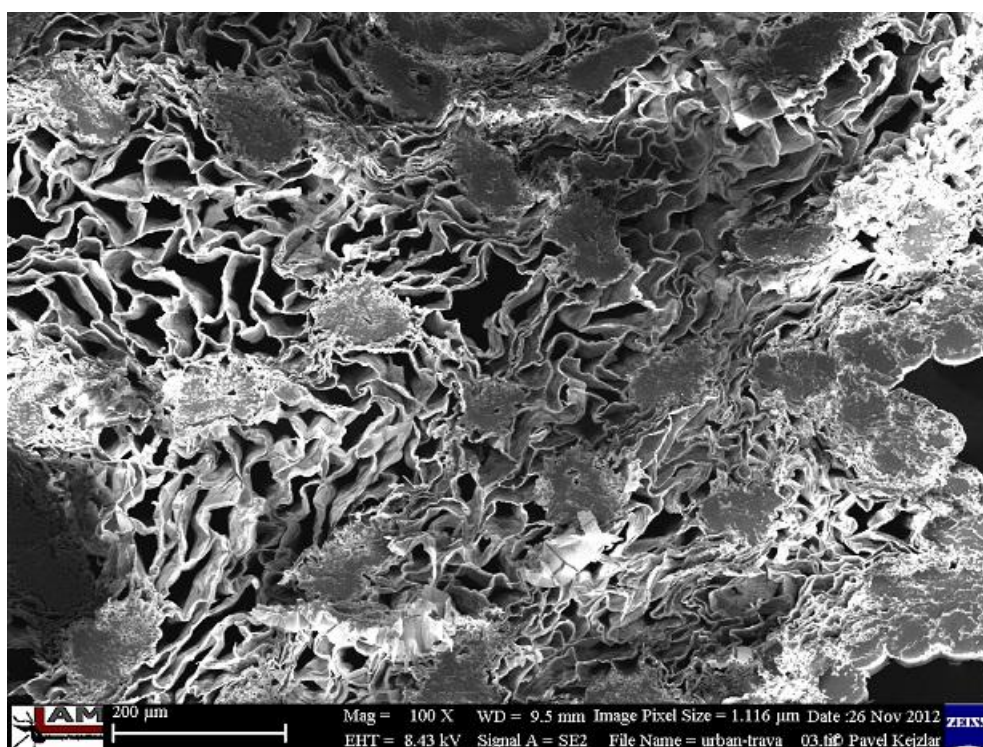
Obr. 35: Snímek šáchoru střídavolistého.

(www.ozwatergardens.com.au)

Vzorek stonku, který byl použit pro pozorování elektronovým mikroskopem, bohužel utrpěl nezbytným vysušením, nicméně pórovitá struktura je zde stále patrná (obr. 36 a 37). Tenká vnější část stonku se nazývá epidermis (e) a slouží jako ochrana rostliny a jako prostředek látkové výměny s okolím. Těsně pod touto vrstvou se nacházejí tzv. sklerenchymatická vlákna (s1), která slouží jako opora stonku a mají největší vliv na celkovou mechanickou pevnost. Zbylá část stonku směrem ke středu je vyplněna tzv. parenchymatickým pletivem (a), které je tvořeno velkými póry, o velikosti cca 80 až 120 μm . Toto pletivo slouží k vedení plynů a vody uvnitř rostliny, což znamená, že tato většinová část stonku je velmi lehká. Navíc se sklerenchymatická vlákna nacházejí i v této části ve formě svazků. Na snímcích z elektronového mikroskopu jsou tyto svazky patrné jako celistvé ostrůvky (s2) (www.sci.muni.cz).



Obr. 36: Snímek příčného řezu stonku šáchoru střídavolistého (zvětšeno 50x).
(SEM - TUL)



Obr. 37: Snímek příčného řezu stonku šáchoru střídavolistého (zvětšeno 100x).
(SEM - TUL)

3.1.6 Stonek sítiny rozkladité

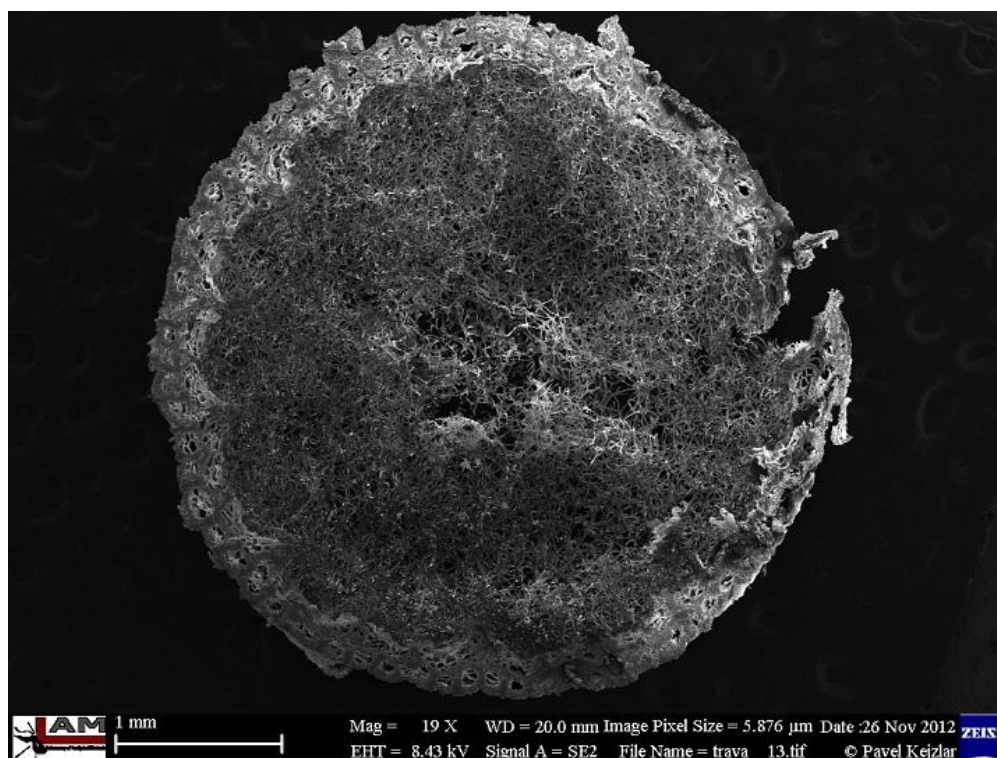
Sítina rozkladitá (latinsky *Juncus effusus* L.) (obr. 38) je vytrvalá trsovitá rostlina, která roste nejčastěji v bažinách či blízko vod po celé Evropě. Její stonek je přímý, hladký a bez přehrádek stejně jako stonek šáchoru střídavolistého. Může dosahovat výšky až 150 cm (www.botany.cz). Vnitřek stonku je tvořen pěnovitou hmotou, která byla cílem pozorování.



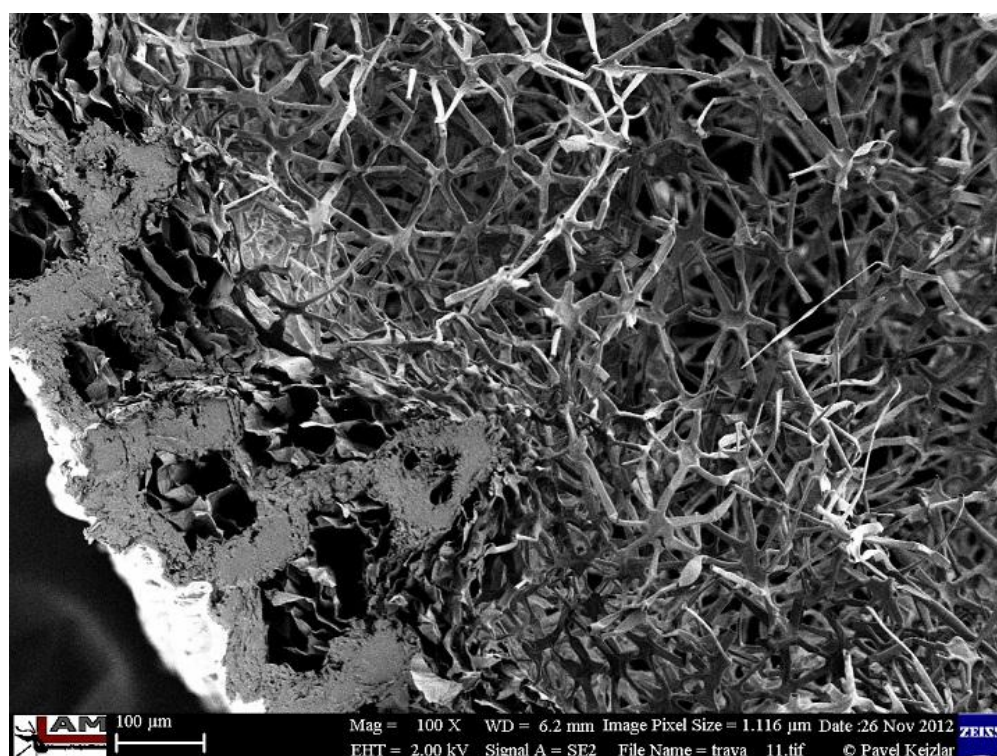
Obr. 38: Snímek sítiny rozkladité.

(www.science.halleyhosting.com)

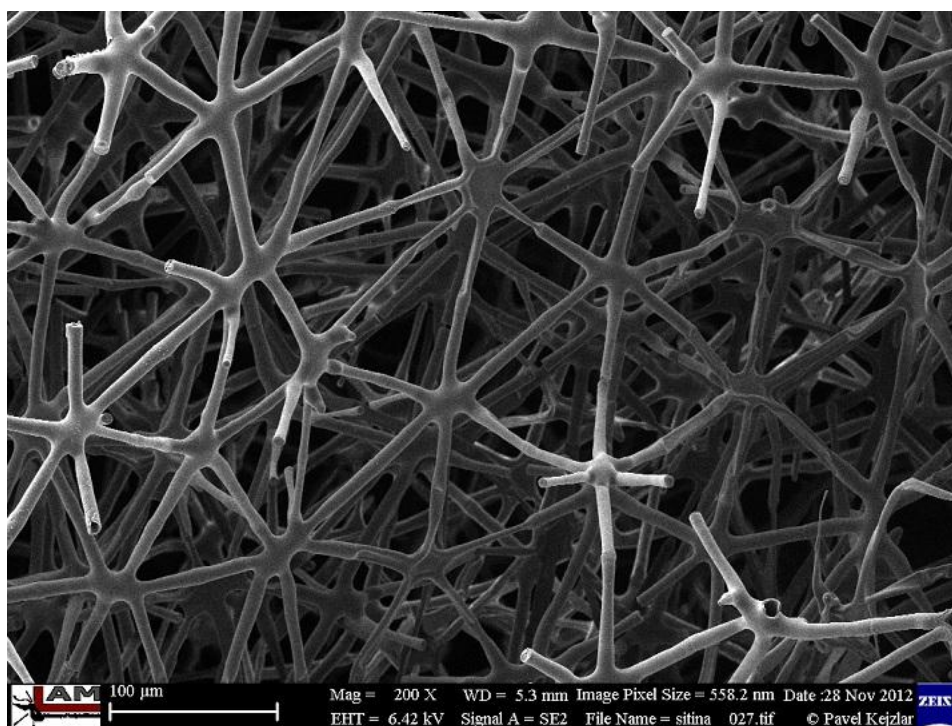
Pěnovitá struktura tvoří značnou část stonku (obr. 39) a je tvořena systémem dutých, pěti až sedmicípých hvězdic, které jsou navzájem pospojované a v podstatě tvoří pravidelnou strukturu (obr. 41). Tato struktura je speciální druh parenchymatického pletiva, tzv. aerenchym, které se vyskytuje převážně u bahenních a vodních rostlin, u kterých zlepšuje provzdušňování. Průměr jednotlivých trubic je cca 10 μm a vzdálenost mezi středy hvězdic (místa, kde se trubice spojují) je cca 100 μm . Vnější část stonku je velice podobná vnější části stonku šáchoru střídavolistého, tudíž bude mít pravděpodobně stejnou stavbu. Pod tenkou vnější epidermickou vrstvou budou nejspíše opět svazky sklerenchymatických vláken, jelikož podélné půlení stonku probíhá podél těchto vláken (stejně jako u šáchoru střídavolistého).



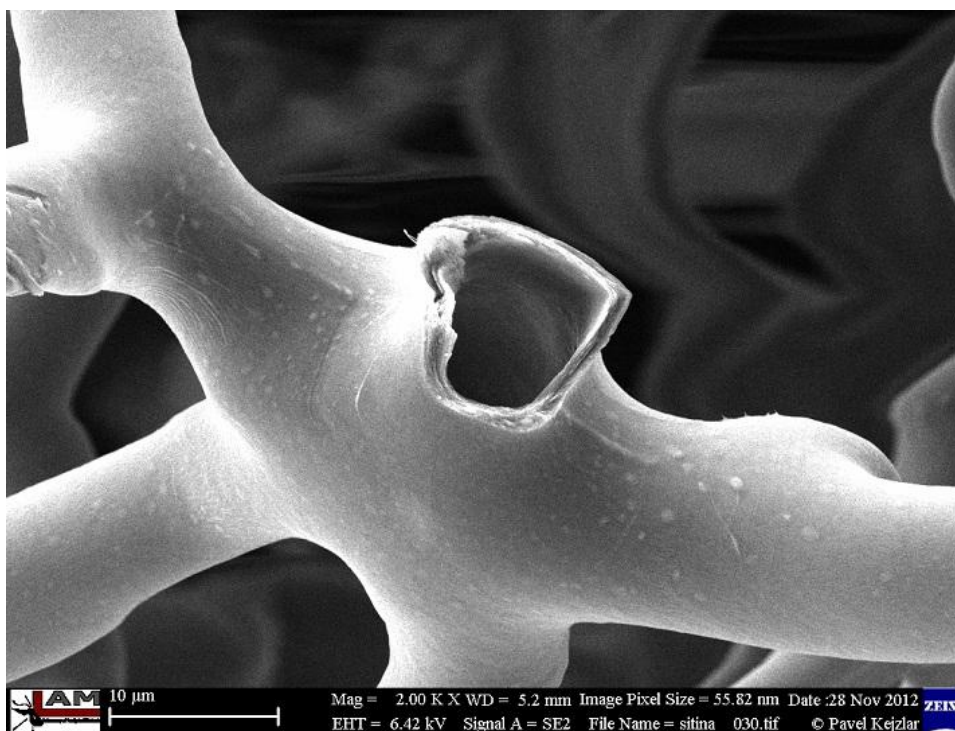
Obr. 39: Snímek stonku sítiny rozkladité (zvětšeno 19x).
(SEM - TUL)



Obr. 40: Snímek stonku sítiny rozkladité (zvětšeno 100x).
(SEM - TUL)



Obr. 41: Snímek detailu hvězdčicovité struktury stonku sítěny rozkladité (zvětšeno 200x).
(SEM - TUL)



Obr. 42: Snímek detailu dutého aerenchymatického pletiva
stonku sítěny rozkladité (zvětšeno 2 000x).
(SEM - TUL)

3.1.7 Stonek bezu černého

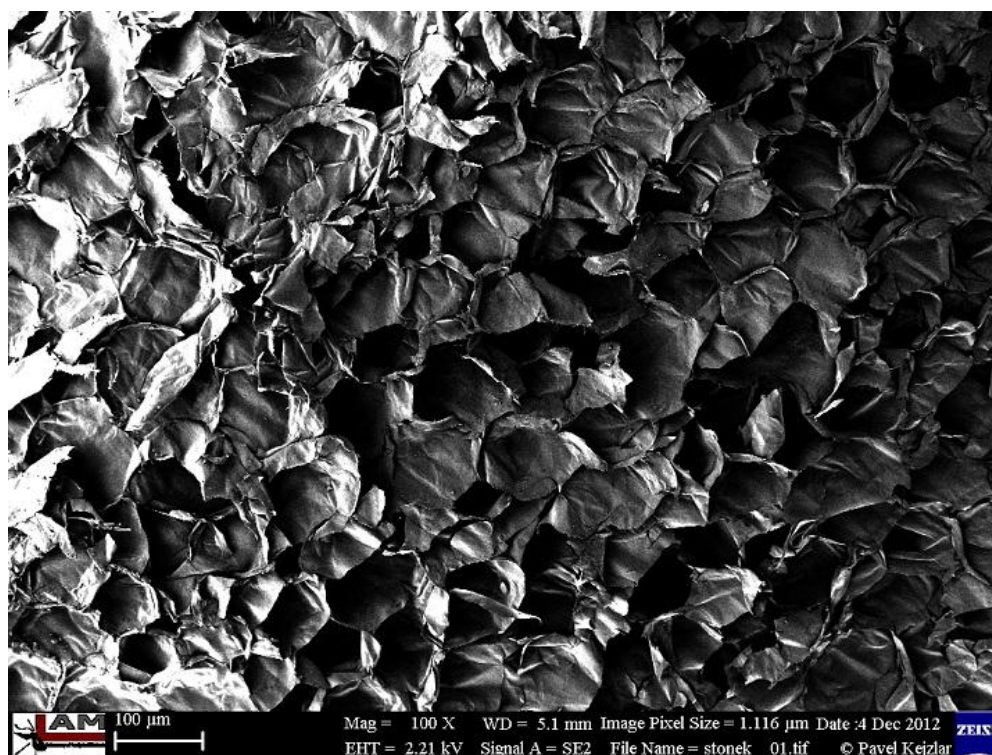
Bez černý (latinsky *Sambucus nigra*, L.) (obr. 43) je poměrně známá, keřovitá rostlina (dorůstá výšky 7 až 10 m), která roste volně v přírodě, nejčastěji na mezích, kamenitých místech a lesních mýtinách. Je známý především velmi intenzivní vůní v době květu a také černými, kulovitými a peckovitými plody, které jsou mírně jedovaté. Bez černý je pro své léčivé účinky hojně využíván v lékařství a široké využití nachází i v potravinářství (především plody) (Wikipedia, 2012).



Obr. 43: Snímek plodů a listů bezu černého.

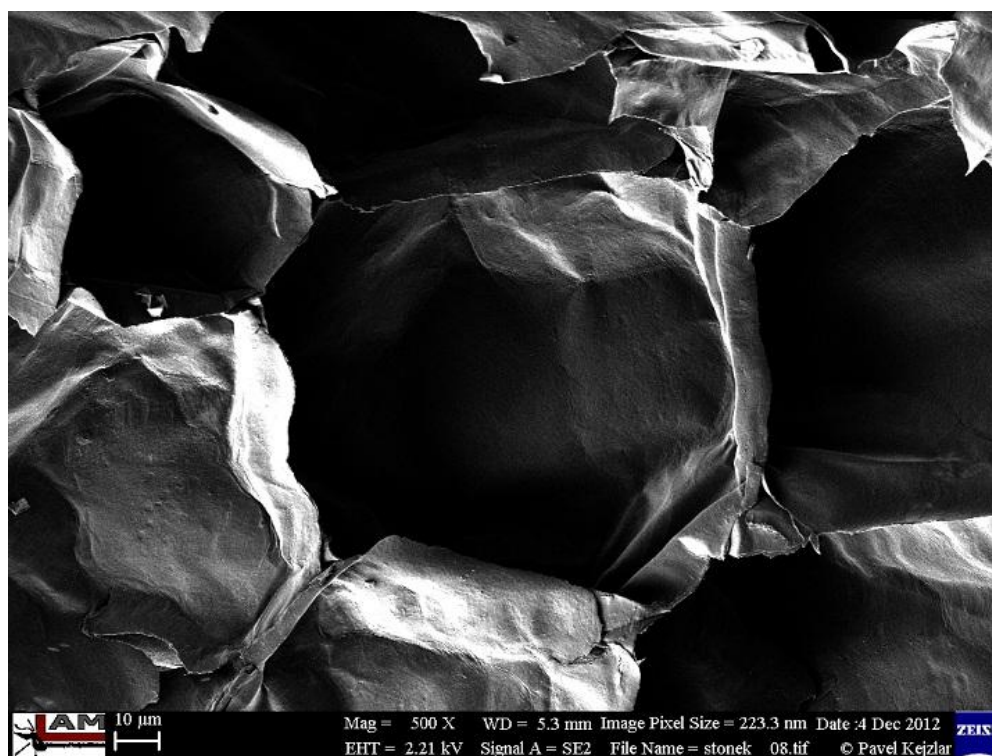
(www.receptyonline.cz)

Pro pozorování na elektronovém mikroskopu byl vybrán, stejně jako u předchozích rostlinných vzorků (šáchoru střídavolistého a sítiny rozkladité), příčný řez stonkem. Na SEM snímcích je dobře vidět pórovitý charakter parenchymatického pletiva (obr. 44). Pohled na detail póru (obr. 45) odhaluje, že jednotlivé póry se jeví jako vůči sobě uzavřené, což se velmi liší od předchozích rostlinných vzorů, kde byly póry otevřené. Jednotlivé póry mají pravidelný mnohoúhelníkový tvar (obr. 45) o průměru cca 120 μm a jsou mezi sebou odděleny pouze tenkou blánou, která je tvořena slepenými stěnami sousedících pórů. Slepené stěny jsou dobře patrné na SEM snímku detailu stěny póru (obr. 46). Tato vnitřní část stonku je tedy velice lehká a stejně jako u ostatních rostlin slouží k vedení živin.



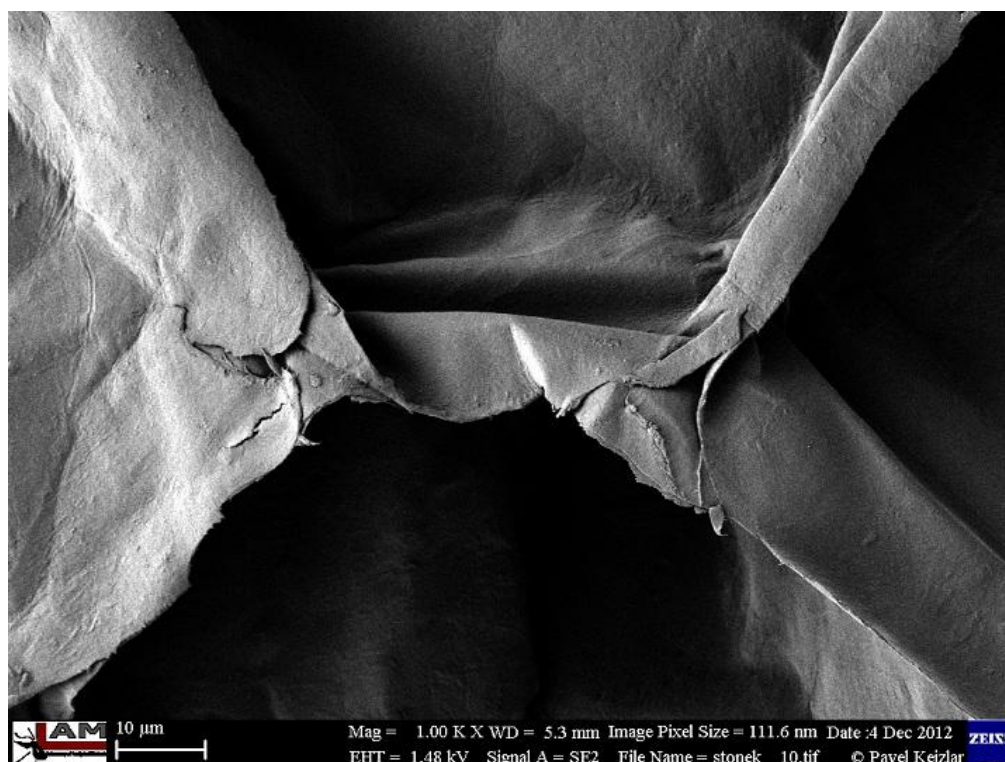
Obr. 44: Snímek vnitřní části stonku bezu černého (zvětšeno 100x).

(SEM - TUL)



Obr. 45: Snímek detailu póru vnitřní části stonku bezu černého (zvětšeno 500x).

(SEM - TUL)

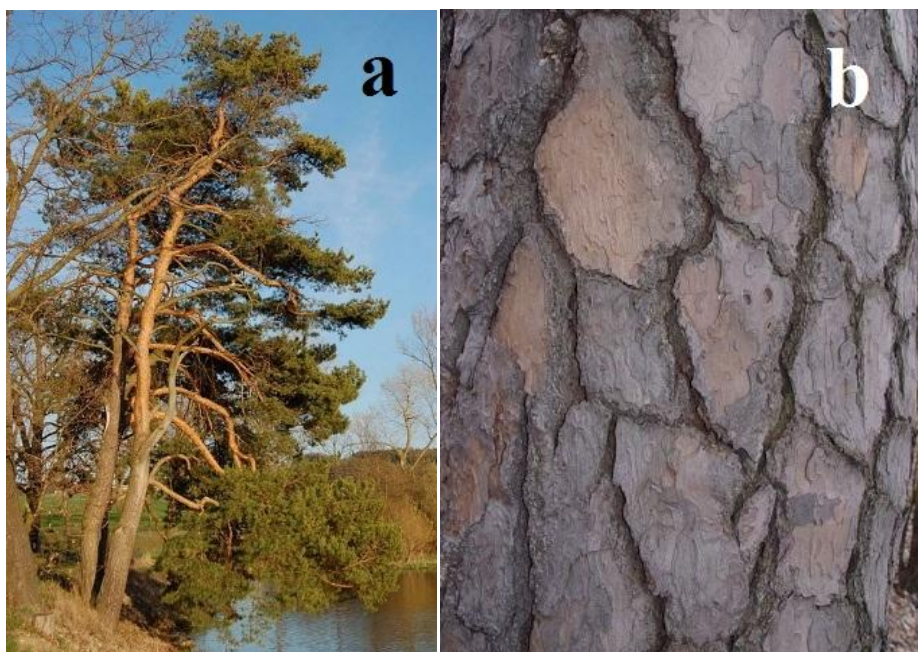


Obr. 46: Snímek detailu stěny póru vnitřní části stonku bezu černého (zvětšeno 1000x).
(SEM - TUL)

3.1.8 Kůra borovice lesní

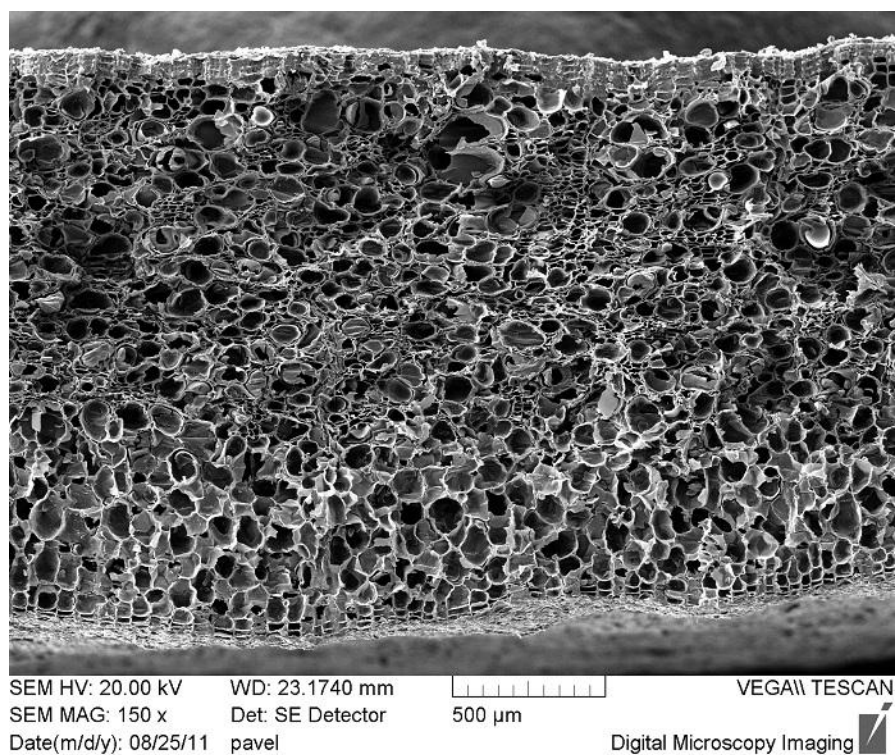
Kůra, neboli borka, jak zní správné vědecké označení, je vnější část kmene stromu, která je tvořena odumřelými vrstvami lýka, nacházejícího se těsně pod borkou. Neustálý růst stromu pak způsobuje, že neelastická borka praská, a na jejím povrchu se vytváří typický reliéf, který se u jednotlivých druhů stromů liší. Její funkce spočívá především v ochraně vnitřku stromu před škodlivými vlivy okolí (hmyz, počasí) a proto je pro strom životně důležitá.

Pro pozorování byla vybrána borka borovice lesní (latinsky *pinus sylvestris*, *L.*) (obr. 47 a), která je v Evropě ze všech tzv. tvrdých borovic (rod *Pinus*) nejrozšířenější. Jedná se o jehličnatý strom (dlouhé jehlice) dorůstající se výšek až 30 m, výjimečně více. Má zpočátku hnědošedou, později šedorůžovou kůru, která se člení do velkých desek, rozdělených hlubokými brázdami (obr. 47 b). Dřevo borovice lesní je velmi lehké, měkké a pružné a hojně se využívá při stavbě lodí, či jako výborné palivo (Kremer, 1995, s. 50, 274-276).



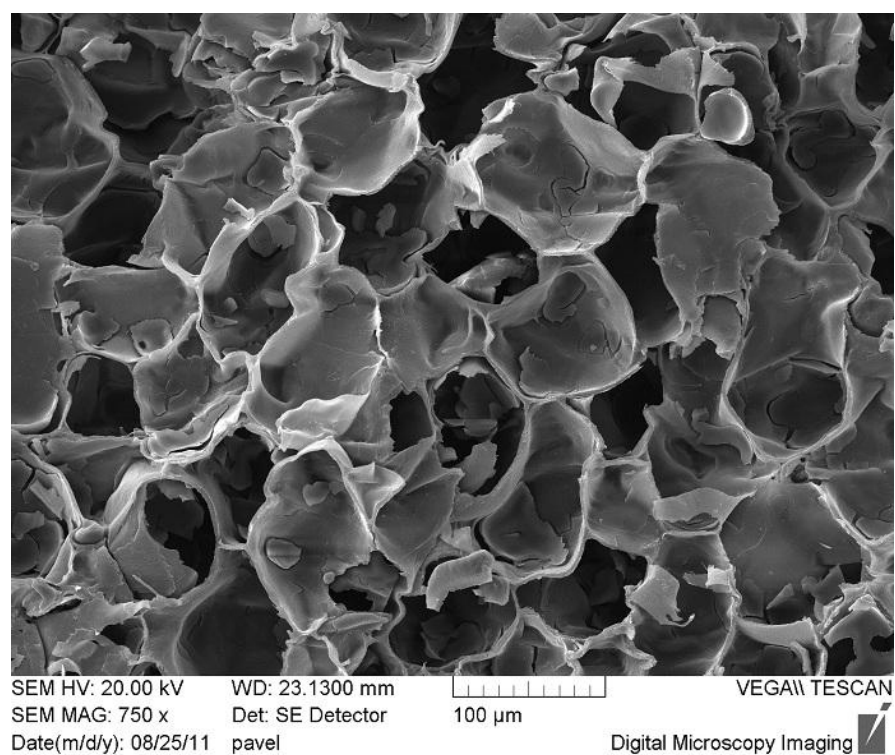
Obr. 47: Snímky (a) borovice lesní; (b) detailu borky borovice lesní.
(www.biolib.cz)

SEM snímky vnitřní struktury borky borovice lesní odhalují parenchym, tvořený kulovitými buňkami (obr. 48). Buňky se jeví jako uzavřené, tudíž tvoří uzavřenou pórovitou strukturu (obr. 49). Velikost buněk, tedy pórů, je v průměru cca 90 μm a jsou mezi sebou navzájem odděleny stěnou o tloušťce cca 2 až 3 μm .



Obr. 48: Snímek vnitřní struktury borky borovice lesní (zvětšeno 150x).

(SEM - TUL)

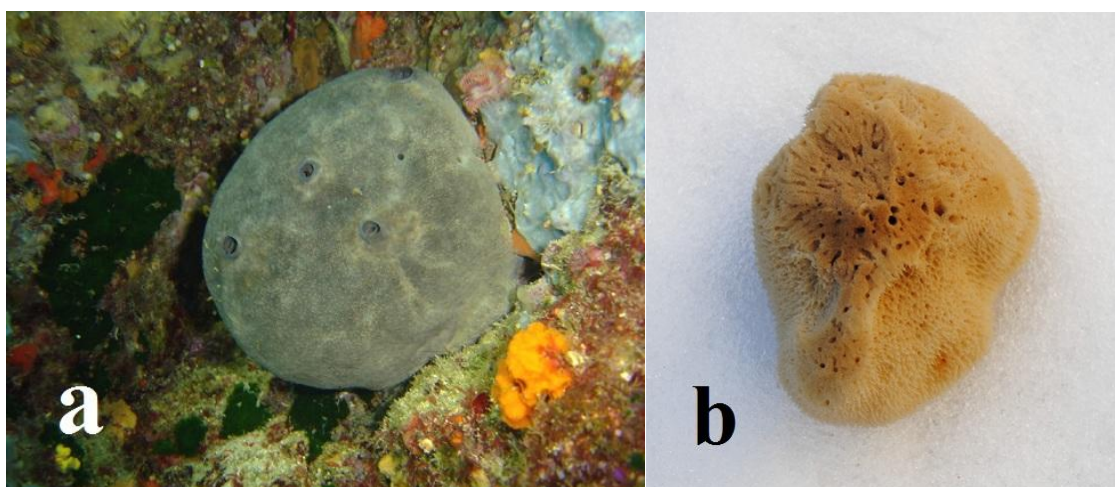


Obr. 49: Snímek vnitřní struktury borky borovice lesní (zvětšeno 750x).

(SEM - TUL)

3.1.9 Mořská houba

Mořské a sladkovodní houby jsou jednodušší vodní živočichové, patřící do kmene houbovců (latinsky porifera). Jejich tělo má vakovitý tvar a kromě larválního stádia žijí přisedle na korálech a kamenech. Jako potrava jim slouží malé organismy, které filtrují z vody svým tělem. Vynikají velkou schopností regenerace, díky které se mohou množit i z odlomených částí (wikipedia, 2012).



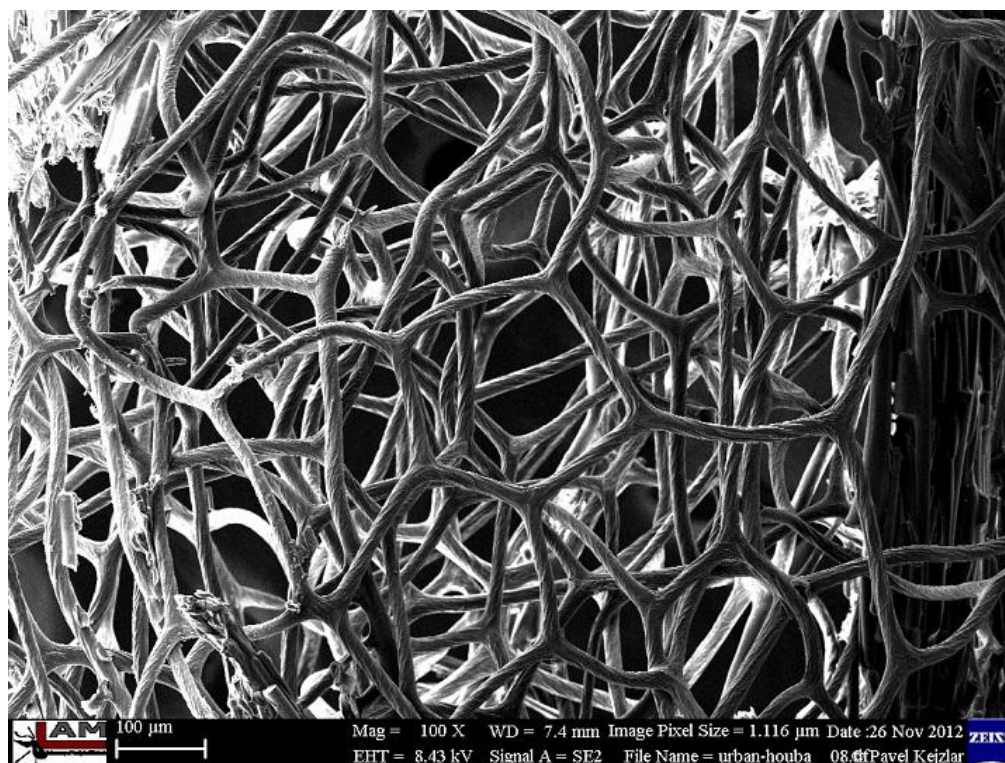
Obr. 50: Snímky (a) živé mořské houby (*Spongia officinalis*); (b) vysušeného měkkého endoskeletu mořské houby.

((a) www.subaqua.web.cern.ch; (b) www.axzion-import.se)

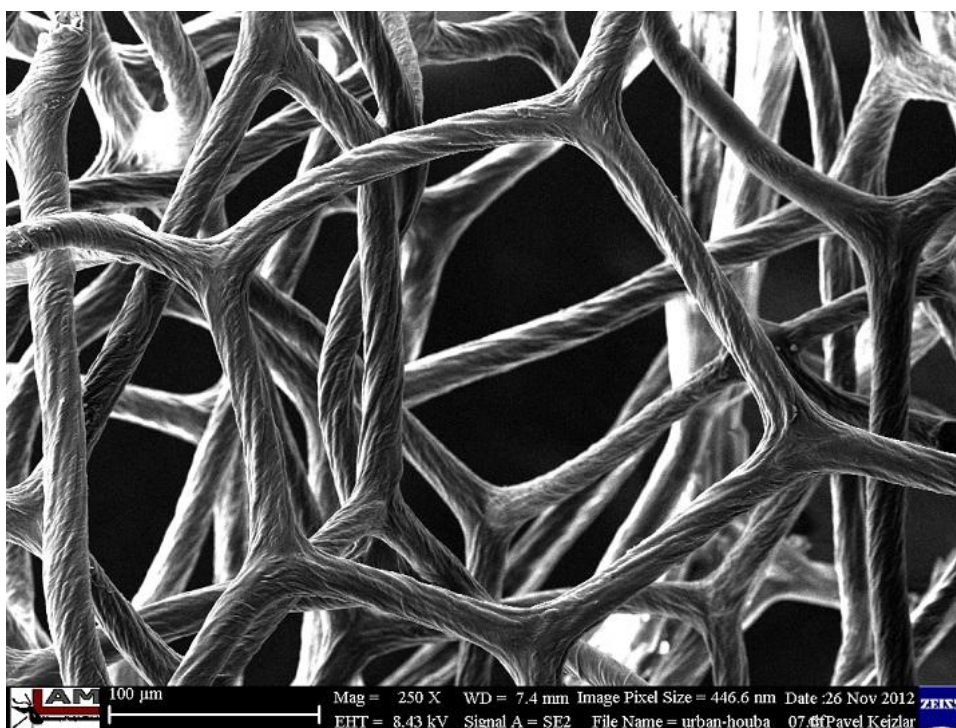
Jako vnitřní opora houbovcům slouží tzv. endoskelet (vnitřní kostra). Ten je tvořen rosolovitou matricí (mesohyl), která je vyztužena minerálními jehlicemi a pružnými vlákny z tzv. sponginu (druh vláknitého proteinu). Materiál jehlic je nejčastěji SiO_2 a CaCO_3 . Většina druhů houbovců má endoskelet velmi pevný a tvrdý, nicméně existuje několik druhů, u kterých je endoskelet měkký a vláknitý. Tato měkká struktura byla v dřívějších dobách velmi využívána člověkem (mycí houba, polstrování, aj.) a masivními výlovy byly tyto druhy téměř vyhubeny. Dnes jsou tyto houby z velké části nahrazeny houbami ze syntetických materiálů (wikipedia, 2012).

Pro pozorování byl použit vzorek vysušeného měkkého endoskeletu mořské houby (pravděpodobně druhu *Spongia officinalis*). Na snímcích z elektronového mikroskopu je dobře vidět vláknitá struktura endoskeletu (obr. 51 a 52). Vlákna, cca 15 μm silná,

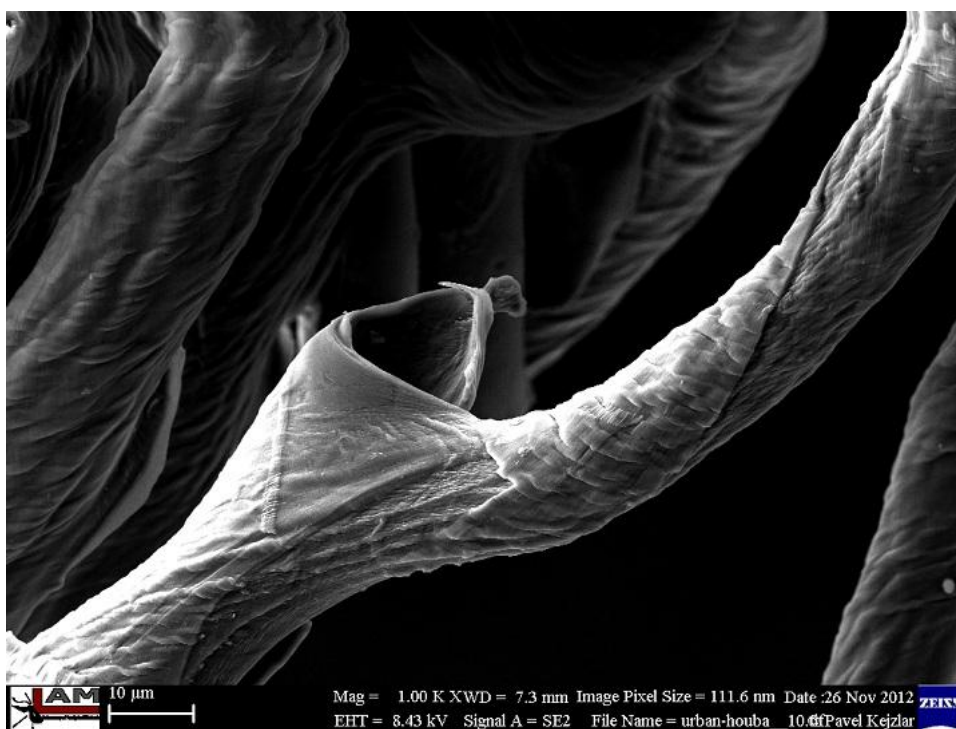
jsou navzájem pospojovaná spíše chaoticky, tudíž netvoří pravidelnou strukturu. Celý systém vláken je otevřený, jelikož živé mořské houbě slouží jako výztuha rosolovité matrice mesohylu. Na obr. 53 je detail vlákna, na kterém je vidět podélný spirálovitý šev. Ten napovídá, jak se pravděpodobně vlákna tvoří, tedy postupným spirálovitým růstem. Zároveň je na obr. 53 vidět i vznik nového ramene, na kterém je opět vidět spirálovitý charakter růstu.



Obr. 51: Snímek vláknité struktury endoskeletu mořské houby (zvětšeno 100x).
(SEM - TUL)



Obr. 52: Snímek vláknité struktury endoskeletu mořské houby (zvětšeno 250x).
(SEM - TUL)



Obr. 53: Snímek detailu vlákna, kterými je tvořen endoskelet mořské houby
(zvětšeno 1000x).
(SEM - TUL)

4 Výsledky a jejich diskuse

U všech desíti pozorovaných přírodních objektů byly nalezeny pórovité struktury, lišící se tvarem, velikostí a typem pórů. Jednotlivé vzorky by se daly rozdělit do dvou skupin, a to na živočišné a rostlinné objekty. Mezi živočišné objekty patří skelet a zub ježovky černé, skelet ježovky srdcové, sépiová kost, vejce kura domácího a endoskelet mořské houby. Hlavní funkce všech těchto částí živočichů je ochrana, vyztužení či zpevnění, tedy dosažení co nejlepších mechanických vlastností se zachováním nízké hmotnosti a možnosti látkové výměny s okolím. U objektů rostlinných, mezi které patří stonky šáchoru střídavolistého, sítiny rozkladité a bezu černého má pórovitá struktura především funkci prostředku pro transport živin, vody, či vzduchu. Funkci vyztužující a zpevňující zde mají spíše sklerenchymatická vlákna, která se nacházejí ve vnější části stonku. Borka borovice lesní, která by se také dala zařadit mezi rostlinné objekty, je tvořena již odumřelými buňkami, a proto již neplní funkci transportu živin. Využívá ale vzniklé pórovité struktury jako odlehčení a nadále stromu slouží jako ochranná vrstva.

Skelet a zub ježovky černé a skelet ježovky srdcové mají velmi podobnou strukturu pórů. Jejich velikost se převážně pohybuje okolo 10 μm , mají kruhovitý tvar a tvoří otevřený systém. Je zde také patrný tzv. gradient pórovitosti, neboli střídání či plynulá změna velikosti nebo množství pórů (např. změna pórovitosti mezi vnitřním a vnějším povrchem skeletu ježovky černé (obr. 13 a 16), či změna velikostí pórů v různých částech vnějšího povrchu skeletu ježovky srdcové (obr. 23)). Z technických materiálů jsou těmito strukturám jak stavbou, tak materiálem nejbližší keramické pěny vyrobené replikační metodou (obr. 6 b). Ty mají ale ostřejší hrany jednotlivých „vazů“, což je způsobeno výrobními metodami polymerních předloh, kdy jsou samotné póry tvořeny bublinkami plynu. Velký rozdíl je i ve velikostech pórů. U skeletů a zubu ježovek dosahovaly průměry pórů cca 10 μm , kdežto póry u keramických pěn mají průměry řádově v desetinách milimetru. Celkově jsou struktury skeletů a zubu pravidelnější a obsahují méně vad.

Sépiová kost má velmi charakteristickou pravidelnou strukturu. Je tvořena hranatými komůrkami (obr. 28), které slouží pro vyrovnávání hydrostatického vztlaaku a jako celek pak vytvářejí pevnou a lehkou oporu těla sépie. V porovnání s technickými materiály je

sépiová kost v podstatě honeycomb, který je právě takto se opakující pravidelnou strukturou typický (obr. 8). Oproti technické praxi se však zde opět pohybujeme ve velmi malých rozměrech. Tloušťka stěn komůrek se pohybuje v rozmezí 5 až 15 μm a rozměry jednotlivých komůrek jsou řádově v desetinách milimetru.

Skořápka vejce kura domácího je tvořena třemi vrstvami, kterými jsou kutikula, krystalická část a vnitřní blána (obr. 32). Nejzajímavější je krystalická část skořápky. Je tvořena pilíři, které vznikají postupným růstem krystalů uhličitanu vápenatého (CaCO_3). Mezi těmito pilíři se nacházejí otevřené průchozí póry, jejichž průměr je cca 5 μm (obr. 33). Vnitřní blána má strukturu odlišnou. Tvoří ji vlákna, která se navzájem kříží, a tvoří tak jakousi síť (obr. 34). Tloušťka jednotlivých vláken se pohybuje okolo 2 μm . Kutikula je pouze tenká elastická vrstvička na vnější straně skořápky, která zlepšuje její mechanické vlastnosti. Struktura skořápky vejce je velmi specifický pórovitý systém, který se nepochybně podobá žádnému materiálu z technické praxe. O to je však zajímavější, neboť na přesných rozměrech pórů a na kvalitě struktury jako celku závisí život vyvíjejícího se organismu uvnitř vejce.

Stonek šáchoru střídavolistého byl bohužel zdeformován nezbytným vysušením, nicméně u parenchymatického pletiva, které tvoří převážnou část stonku, lze předpokládat pravidelnou strukturu kruhovitých či mnohoúhelníkovitých palisádových buněk (obr. 36). Jejich průměr je cca 80 až 120 μm a slouží k vedení vody a plynů v rostlině. Stonek je také vyztužen svazky sklerenchymatických vláken, které zlepšují jeho mechanické vlastnosti. Pravidelná struktura palisádových buněk se zde opět nejvíce podobá honeycombům vyráběným v technické praxi.

Stonek sítiny rozkladité je tvořen pěnovitou hmotou, tzv. aerenchymem. Tvoří ho duté, pěti až sedmicípé hvězdčité útvary, které jsou navzájem pospojované. Jedná se o otevřenou pěnovitou strukturu. Nejvíce se podobá struktuře keramické pěny vyrobené replikační metodou (obr. 6 b), se kterou se shoduje i v dutém průřezu (obr. 6 c; obr. 42). U sítiny rozkladité je však struktura pravidelnější a uspořádanější. Průměry trubic jsou u sítiny cca 10 μm a u keramické pěny cca 70 až 140 μm .

Bez černý má stonky opět tvořen převážně parenchymatickým pletivem, jehož buňky se ale na SEM snímcích jeví jako uzavřené (obr. 45). Jednotlivé buňky mají tvar mnohostěnu a celá struktura stonku je velmi podobná struktuře polystyrenových kuliček (obr. 3 c). Ty jsou tvořeny také uzavřenými mnohoúhelníkovitými póry, jež jsou mezi sebou odděleny pouze slabými stěnami. Průměr pórů vnitřní části stonku bezu černého je cca 120 μm a průměr pórů uvnitř kuličky polystyrenu je cca 30 až 40 μm .

Borka borovice lesní, stejně jako borka jiných stromů, je tvořena odumřelými buňkami lýkovité části stromu. Tyto buňky mají kulovitý tvar a tvoří uzavřenou strukturu (obr. 49). Celková struktura je velmi podobná struktuře keramických pěn, které jsou vyrobeny metodou přímého zpěňování (obr. 7 a), či metodou vypálení polymerních kuliček (obr. 7 c). Přímým zpěňováním je možné získat póry o průměru 35 μm a více. Metodou vypálení polymerních kuliček je možné získat póry menší, cca 25 μm . Průměr pórů borky borovice lesní je cca 90 μm .

U mořské houby byl pozorován vysušený endoskelet (vnitřní kostra). Ten je tvořen jehlicemi (nejčastěji z SiO_2 , nebo CaCO_3), které jsou spojené vlákny ze sponginu (druh vláknitého proteinu). Struktura endoskeletu má nepravidelný vláknitý charakter (obr. 51) a ze zmíněných technických pěn jsou strukturálně nejpodobnější pěny polyuretanové (obr. 4, 6 a) a pěny keramické, vyrobené replikační metodou (obr. 4 b). Podobnost je ale velmi vzdálená, neboť princip výroby polyuretanových pěn, které jsou zároveň vzorem pro pěny keramické, neumožňuje dosažení struktury takového vláknitého charakteru, jaký má endoskelet mořské houby. Průměr vláken polyuretanových a keramických pěn je cca 70 až 140 μm a průměr vláken endoskeletu mořské houby je cca 15 μm .

5 Závěr

Cílem bakalářské práce byl výběr deseti přírodních objektů, které jeví známky pórovité struktury, zhotovení snímků jednotlivých vzorků na rastrovacím elektronovém mikroskopu, a nakonec porovnání těchto přírodních struktur se strukturami pórovitých materiálů vyrobených člověkem. Mezi vybrané přírodní objekty patří skelet a zub ježovky černé (*Arbacia lixula*), skelet ježovky srdcové (*Echinocardium cordatum*), sépiová kost (*Sepia officinalis*), skořápka vejce kura domácího (*Gallus gallus domesticus*), stoněk šáchoru střídavolistého (*Cyperus alternifolius*), stoněk sítiny rozkladité (*Juncus effusus* L.), stoněk bezu černého (*Sambucus nigra*, L.), kůra borovice lesní (*Pinus sylvestris*, L.) a vysušený vnitřní skelet (endoskelet) mořské houby (*Spongia officinalis*).

U všech pozorovaných přírodních objektů byly zjištěny různorodé pórovité struktury, jež daným živočichům či rostlinám slouží mnoha způsoby. Ať už je to vedení živin v rostlinných stoncích, odlehčení skeletů živočichů či prostředek pro regulaci vztlaku vody, vždy je pórovitá struktura přizpůsobena pro daný účel. U skeletu ježovky černé a ježovky srdcové byl pozorován tzv. gradient pórovitosti, neboli plynulá změna množství či velikosti pórů v průřezu či různých částech skeletu. Tato vlastnost je pro přírodní pórovité materiály typická, neboť umožňuje dokonalé přizpůsobení struktury daným účelům. V technické praxi se takovéto plynulé změny pórovitosti dosahuje zatím pouze na experimentální úrovni.

Porovnání přírodních struktur se strukturami materiálů syntetických ukázalo, že příroda je schopna pracovat s daleko menšími póry, které tvoří v obdivuhodně přesných rozměrech a tvarech, a to vše s minimální energetickou náročností. Člověk je zatím omezen pouze několika technologiemi, které ve většině spočívají v tvorbě pórů pomocí bublinek plynu v tavenině kovu, polymeru či keramické břečce. V přírodě tyto pórovité struktury vznikají postupným růstem, což umožňuje v podstatě neomezené tvůrčí možnosti.

Další studium a vývoj porézních materiálů je pro technickou praxi důležitý, neboť je nezbytný pro zlepšování a inovace zejména v oblasti ultralehkých materiálů. Tyto materiály nacházejí uplatnění hlavně v automobilovém, leteckém a vesmírném průmyslu, kde jsou hlavními požadavky nízká hmotnost a vysoká pevnost.

6 Literatura a použité zdroje

ASHBY, M. F. aj., Metal foams: a design guide [online]. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000, s. 24 [vid. 2012-09-27].

Dostupné z: <http://www.scribd.com/doc/7009714/Metal-Foams>

Bez černý. In: Wikipedia: otevřená encyklopedie [online]. Los Angeles (California): Wikimedia Foundation, strana naposledy edit. 2012-10-28, 21:19 [vid. 2012-11-18]. Česká verze.

Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/bez_černý

BIRCHALL, J. D. a N. L. THOMAS, On the architecture and function of cuttlefish bone. *Journal of materials science* [online]. Cheshire: Imperial chemical industries, July 1983, vol. 18, iss. 7, p. 2081-2086. [vid. 2012-10-18].

Dostupné z: <http://link.springer.com/article/10.1007%2FBF00555001?LI=true>

COLOMBO, P., Conventional and novel processing methods for cellular ceramics [online]. Pennsylvania: The Pennsylvania State University, 2005 [vid. 2012-09-30].

Dostupné z: <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/364/1838/109.full>

Cvičení z cytologie a anatomie rostlin, *Polodetail příčného řezu stonkem šáchoru* [online]. Brno: Masarykova univerzita v Brně [vid. 2012-11-15].

Dostupné z: http://www.sci.muni.cz/~anatomy/stems/html/cyperus_2.htm

Houbovci. In: Wikipedia: otevřená encyklopedie [online]. Los Angeles (California): Wikimedia Foundation, strana naposledy edit. 2012-12-19, 6:21 [vid. 2012-12-21]. Česká verze.

Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Houbovci>

JÄGER, A. a V. GÄRTNEROVÁ, Elektronovým mikroskopem do nitra materiálů aneb jak vypadá jejich struktura [online]. Praha: Fyzikální ústav AV ČR, 2008 [vid. 2012-10-05]. Dostupné z: <http://www.fzu.cz/popularizace/elektronovym-mikroskopem-do-nitra-materialu-aneb-jak-vypada-jejich-struktura>

Katedra zoologie a ornitologická laboratoř, *Exkurze z mořské biologie ZOO/MOREX* [online]. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci [vid. 2012-10-16].

Dostupné z: http://www.zoologie.upol.cz/morex/protokolVII_MOREX.pdf

KÖRNER, C., Foam formation mechanisms in particle suspensions applied to metal foams. *Materials science and engineering* [online]. Erlangen: University of Erlangen, November 2008, vol. 495, iss. 1-2, p. 227-235. [vid. 2012-09-27].

Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509308001664>

KREMER, B. P., *Stromy*. Praha: Ikar, 1995, s. 50, 274-276, ISBN 80-85830-92-2.

KŘIVÁNEK, R. Vlastnosti a použití kovových pěn [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. s. 11. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Němec, Ph.D. [vid. 2012-09-27]. Dostupné z:

http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=56107

OSSA, A. a M. P. ROMO, Dynamic characterization of EPS geofoam. *Geotextiles and geomembranes* [online]. México: Universidad Nacional Autónoma de México, February 2011, vol. 29, iss. 1, p. 40-50. [vid. 2012-09-28].

Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266114410000762>

PATRICK, J. F., N. R. SOTTOS a S. R. WHITE, Microvascular based self-healing polymeric foam. *Polymer* [online]. Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, August 2012, vol. 53, iss. 19, p. 4231-4240. [vid. 2012-09-28].

Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032386112005885>

PECHOUŠEK, J., Měření plochy povrchu pevných látek a určování jejich porozity metodou sorpce plynu [online]. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2010, s. 11-12 [vid. 2012-09-25].

Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/ostatni/BET.pdf>

PINKAS, J. a Z. MORAVEC, Stanovení měrného povrchu metodou BET [online].
Brno: Masarykova univerzita Brno, s. 1 [vid. 2012-09-25].
Dostupné z: http://www.sci.muni.cz/chemsekcce/c8870/pdf/Uloha7_BET.pdf

Mikroskopické centrum Ústavu histologie a embryologie, *Exkurze Rastrovací (scanning) elektronový mikroskop* [online]. Brno: Masarykova univerzita v Brně [vid. 2012-10-05].
Dostupné z: http://www.med.muni.cz/histol/MedAtlas_2/HP_txt8-1-2.htm

Sdružení EPS ČR, *Vlastnosti expandovaného pěnového polystyrenu* [online]. Firemní článek, 2012 [vid. 2012-09-28].
Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/8482-vlastnosti-expandovaneho-penoveho-polystyrenu-eps>

Sea urchin. In: Wikipedia: otevřená encyklopedie [online]. Los Angeles (California): Wikimedia Foundation, strana naposledy edit. 2012-11-18, 18:25 [vid. 2012-10-15]. Anglická verze.
Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Sea_urchin

Spatangoida. In: Wikipedia: otevřená encyklopedie [online]. Los Angeles (California): Wikimedia Foundation, strana naposledy edit. 2012-10-13, 9:41 [vid. 2012-10-16]. Anglická verze.
Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Spatangoida>

ŠENK, V. Keramické porézní materiály - příprava, struktura a vlastnosti [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. Vedoucí diplomové práce prof. RNDr. Jaroslav Cihlář, CSc [vid. 2012-09-30]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=41916

Vejce. In: Wikipedia: otevřená encyklopedie [online]. Los Angeles (California): Wikimedia Foundation, strana naposledy edit. 2012-11-08, 15:45 [vid. 2012-11-20]. Česká verze.
Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Vejce>

WANG, R. Z., L. ADDADI a S. WEINER, Design strategies of sea urchin teeth: structure, composition and micromechanical relations to function. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* [online]. London: The Royal Society, April 1997, vol. 352, iss. 1352, p. 469-480. [vid. 2012-10-15].
Dostupné z: <http://rstb.royalsocietypublishing.org/content/352/1352/469>

World database of marine species, *Black sea urchin* [online]. [vid. 2012-10-15].
Dostupné z: http://www.seadb.net/en_Black-sea-urchin-Arbacia-lixula_1181.htm

XIGENG, M. aj., Mechanical and biological properties of hydroxyapatite/tricalcium phosphate scaffolds coated with poly(lactic-co-glycolic acid). *Acta biomaterialia* [online]. Queensland: Queensland University of Technology, May 2008, vol. 4, iss. 3, p. 638-645. [vid. 2012-09-28].
Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1742706107001729>

YUEN, D., Polyurethane flexible foams [online]. Christchurch: New Zealand Institute of Chemistry, 2007 [vid. 2012-09-28].
Dostupné z: <http://nzic.org.nz/ChemProcesses/polymers/10G.pdf>

ZHANG, J. Z., J. G. WANG a J. J. MA, Porous structures of natural materials and bionic design. *Journal of Zhejiang University SCIENCE* [online]. Hangzhou: Zhejiang University, March 2005, vol. 6, iss. 10, p. 1095-1099. [vid. 2012-11-20].
Dostupné z: <http://www.zju.edu.cn/jzus/2005/A0510/A051015.pdf>